



## **TUGAS AKHIR – TM 091585**

### ***STUDI SIMULASI STICK-SLIP FRICTION AKIBAT MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION***

GRANDIKA ANDRAYODI  
NRP 2110 100 055

Dosen Pembimbing  
Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT – TM 091585**

**STUDY SIMULATION OF *STICK-SLIP FRICTION* THAT  
AFFECTED BY *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT*  
*FRICTION***

GRANDIKA ANDRAYODI  
NRP 2110 100 055

Adviser Lecturer  
Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Industrial Engineering Faculty  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**STUDI SIMULASI *STICK-SLIP* AKIBAT *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Mekanika Benda Padat  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**GRANDIKA ANDRAYODI**

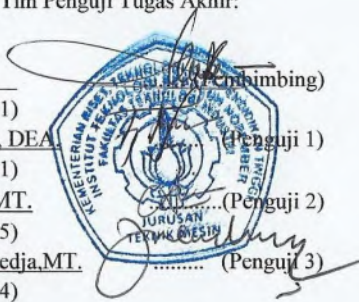
Nrp. 2110 100 055

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Yusuf Kaelani, MSc. E  
(NIP. 196511031990021001)
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA  
(NIP. 196508101991021001)
3. Aida Annisa A. D., ST, MT.  
(NIP. 198907052015042005)
4. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.  
(NIP. 196807061999031004)

**SURABAYA**

**Juli , 2016**



## **STUDI SIMULASI *STICK-SLIP FRICTION* AKIBAT *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION***

**Nama Mahasiswa** : GRANDIKA ANDRAYODI  
**NRP** : 2110100055  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Yusuf kaelani, M.Sc.E

### **Abstrak**

*Dalam kehidupan sehari-hari, tentu sangat tidak asing dengan penggunaan peralatan. Setiap peralatan yang bergerak selalu mengalami kerusakan akibat adanya gaya yang terdapat dari benda padat yang mempunyai kontak. Gaya yang ditimbulkan oleh dua benda yang bergesekan dan arahnya berlawanan disebut gaya gesek. Gaya gesek atau friction yang terjadi pada benda padat terdiri dari dua jenis, yaitu gaya gesek statis dan gaya gesek kinetis. Gesekan tersebut adalah stick-slip friction. Stick-slip friction juga terjadi ketika gerakan suatu benda mencapai kecepatan nol atau diam seketika kemudian bergerak kembali. Studi ini dilaksanakan untuk mengindikasikan daerah stick-slip pada pin dengan bantuan software agar tidak membutuhkan waktu yang lama dengan pengujian langsung atau eksperimental. Adapun penelitian ini dilaksanakan untuk melakukan permodelan simulasi dengan pemrograman daerah stick-slip pada multi-directional contact friction.*

*Penelitian ini diawali dengan analisa kinematika gerakan spesimen untuk menentukan pada rasio kecepatan antara pin dan disk berapakah stick-slip kerap terjadi. Rasio rasio yang akan diamati yaitu pada rasio 0 hingga rasio 25 dengan radius disk sebesar 40 mm dan radius pin 10 mm variasi teta pada teta 0 hingga 6,28 radian, masing-masing rasio pin dan disk akan disimulasikan dengan program bergerak secara rotasi dan saling mengalami kontak permukaan sehingga akan tercipta gesekan ke*

*arah yang berubah-ubah pada permukaan material. Setelah pemrograman dilakukan akan terlihat daerah benda yang mengalami gesekan terbesar yang mempunyai kecepatan nol sesaat. Daerah tersebut di visualisasikan dengan menggunakan program dan setelah itu dianalisa sebagai daerah stick-slip dengan rasio kecepatan tertentu. Sebagai data pembanding dalam pembahasan, diambil juga data penelitian fenomena stick-slip friction akibat multi-directional contact friction secara langsung.*

*Hasil yang didapatkan dari terlaksananya penelitian ini adalah program yang dibuat dapat menunjukan pola lintasan, vektor kecepatan dan mapping daerah stick-slip. Rasio kecepatan yang diindikasikan terjadinya fenomena stick-slip terjadi pada rasio 4 hingga rasio 23 sedangkan rasio yang tidak menimbulkan terjadinya stick-slip terjadi pada rasio 1 sampai rasio 3 dan pada rasio lebih dari 24. Fenomena stick-slip dapat terjadi sepanjang lintasan tetapi tidak terjadi dalam waktu yang bersamaan.*

***Kata kunci : Multi-directional ; Stick-Slip ; Friction***

# **STUDY SIMULATION OF *STICK-SLIP FRICTION* THAT AFFECTED BY *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT* *FRICTION***

<b>Name</b>	<b>: GRANDIKA ANDRAYODI</b>
<b>NRP</b>	<b>: 2110100055</b>
<b>Major</b>	<b>: Teknik Mesin FTI-ITS</b>
<b>Lecturer</b>	<b>: Ir. Yusuf kaelani, M.Sc.E</b>

## **Abstact**

*In everyday life, we are very familiar with the use of equipment. Any equipment that moves will always come to a damage due to the force of the contained solids that have contacts with it. The force that created by two objects that rub against each other and by opposite direction is called the frictional force. There are two types of frictional force that occurs in solid objects, which is the static friction forces and kinetic friction force. The friction is stick-slip friction. Stick-slip friction also occurs when the movement of an object reaches zero speed or suddenly stopped and then move back. The study was done to indicate the stick-slip region of the pin with the help of software so it will not require a long time, it was done by direct test or experimental. This study was undertaken to make modeling simulation with program on a stick-slip region in the multi-directional contact friction.*

*This study begin with an analysist of kinematic movement of the speciments to determine the speed ratio between the pin and the disc, how many times do the stick-slip happens. The ratios that will be observed are between 0 to 25 ratio with a disk radius of 40 mm and 10 mm theta variation from 0 to 6.28 radians, each of the ration pin and disk will be simulated by the moving program*

*in rotation and each other had a contact surface that will create friction in fluctuate direction in the surface of the material. After the programming is done there will appear an object area that have the greatest friction that has zero speed momentarily. That area are visualized with a program and afterwards will be analyzed as a stick-slip area with certain speed. As a comparative data for the study, data were also taken from another research of the phenomenon of stick-slip friction due to multi-directional direct contact friction.*

*The results obtained from this study is the implementation of a program created to show the trajectory patterns , vector mapping speed and stick-slip region . The ratio of the speed indicated the occurrence of stick-slip phenomenon occurs at a ratio of 4 to 23 while the ratio ratio that does not cause the occurrence of stick - slip occurs at a ratio of 1 to 3 ratio and the ratio of more than 24. The stick - slip phenomenon may occur along the track but did not happen at the same time*

***Kata kunci : Multi-directional, Stick-Slip, Friction***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga Tugas Akhir dengan judul “**Studi Simulasi *Stick-Slip Friction* akibat *Multi-Directional Contact Friction***” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir ini adalah salah satu mata kuliah wajib pada tahap Sarjana di Jurusan Teknik Mesin. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasihnya kepada :

1. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
3. Ibu Aida Annisa A. D. ST., MT., Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, dan Ir. Julendra Bambang A. MT selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang membangun
4. Dedi Iskandar dan Nita Suryani sebagai orang tua dan Gratika Anandita sebagai saudara penulis yang selalu memberikan dukungan serta doa untuk penulis.
5. Sheny Novindra sebagai calon pendamping hidup yang tiada hentinya memberikan dukungan penuh kepada penulis.
6. Roy Yamsi selaku teman seperjuangan yang telah membantu dan menemani membuat tugas akhir ini.
7. Rekan-rekan Jurusan Teknik Mesin semuanya yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, terima kasih atas bantuan serta dorongannya.



Pendekatan dan metodologi yang diterapkan dalam tugas akhir ini tentunya tidak luput dari kekurangan dan kelemahan. Untuk itu segala kritikan, saran, sumbangan pikiran apapun untuk perbaikan tugas ini sangat diharapkan dari pembaca. Akhir kata, semoga tugas ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 29 Juli 2016

Grandika Andrayodi

## DAFTAR ISI

### HALAMAN JUDUL

### LEMBAR PENGESAHAN

### ABSTRAK

KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR SIMBOL .....	xii

### BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3

### BAB II DASAR TEORI

2.1. Gesekan ( <i>Friction</i> ) .....	5
2.2. Keausan ( <i>Wear</i> ) .....	12
2.2.1. Mekanisme Keausan ( <i>Wear Mechanism</i> ) ....	12
2.2.2. Metode Menghitung Volume yang tergerus ..	18
2.2.3. Pelumasan .....	22
2.2.4. Teori <i>Stick-slip</i> .....	23
2.2.5. Pemrograman .....	26
2.6. Penelitian Terdahulu .....	27
2.6.1. Pengujian Keausan <i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i> (UHMWPE) Terhadap <i>Stainless steel</i> .....	27
2.6.2. Pengujian Keausan Permukaan Material Akibat <i>Multi-Directional Contact Friction</i> .....	31

2.6.3. Pengujian Keausan yang Dipengaruhi Oleh <i>Stick-slip Friction</i> Akibat <i>Multi-Directional Contact Friction</i> .....	32
--	----

### **BAB III METODELOGI**

3.1. Langkah-langkah Penelitian .....	37
3.1.1. Studi Literatur dan Observasi .....	38
3.1.2. Perumusan Masalah .....	39
3.1.3. Analisa Kinematika Gerakan Spesimen .....	39
3.1.4. Perhitungan Pola Lintasan .....	40
3.1.5. Pemrograman.....	40
3.1.5.1. Form dibuat Pada <i>Microsoft Visual Basic</i> dengan format .....	42
3.1.5.2. Pemrograman Pola Lintasan .....	48
3.1.5.3. Pemrograman <i>Coding</i> Untuk Membuat Vektor Kecepatan .....	48
3.1.5.4. Pemrograman <i>Mapping</i> .....	49
3.1.5.5. Input Variasi .....	49
3.1.6. Pembuatan Grafik Analisa <i>Iso-friction zones</i> dan Validasi Data Hasil Simulasi dengan Pengujian Langsung .....	50
3.1.7. Kesimpulan dan Saran .....	51
3.2. Perencanaan Simulasi .....	51

### **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1. Analisa Perbandingan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Akibat <i>Multi-Directional Contact Friction</i> .....	53
4.1.1. Rasio Kecepatan Pin dan Disk yang Tidak Mengalami <i>Stick-slip</i> .....	53
4.1.2. Rasio Kecepatan Pin dan Disk yang Mengalami Fenomena <i>Stick-slip</i> .....	60
4.2. <i>Multi-Directional Friction</i> pada Pin .....	67
4.3. Fenomena <i>Stick-slip</i> Sepanjang Lintasan Pin .....	70
4.4. Contoh Perhitungan .....	71

4.5. Validasi Hasil Simulasi dengan Pengujian Langsung (Eksperimen) .....	72
--	----

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1. Kesimpulan.....	75
5.2. Saran.....	76

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## **BIODATA PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

<b>GAMBAR 2.1.</b> Sketsa percobaan gesekan oleh Leonardo Da Vinci (a) Balok (b) Balok pada bidang datar (c) Balok pada bidang miring ( <i>Wikipedia.org</i> ).....	5
<b>GAMBAR 2.2.</b> Skema ilustrasi mengenai (a) sebuah benda yang meluncur pada sebuah permukaan yang digambarkan dengan <i>free body diagram</i> , dan (b) sebuah benda yang berputar pada sebuah permukaan horizontal; W adalah beban normal (gaya) dan F adalah gaya gesek.....	7
<b>GAMBAR 2.3.</b> <i>Force Equilibrium Diagram</i> pada sebuah beban yang ditempatkan pada bidang miring.....	8
<b>GAMBAR 2.4.</b> Skema Gambar dari 4 Mekanisme Keausan.....	13
<b>GAMBAR 2.5.</b> Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Adhesif.....	14
<b>GAMBAR 2.6.</b> Mekanisme Keausan Adhesif.....	14
<b>GAMBAR 2.7.</b> Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Abrasif.....	15
<b>GAMBAR 2.8.</b> Mekanisme Keausan Abrasif.....	15
<b>GAMBAR 2.9.</b> Keausan Lelah pada <i>Ball Bearing</i> .....	16
<b>GAMBAR 2.10.</b> Mekanisme Keausan Lelah.....	16
<b>GAMBAR 2.11.</b> Keausan Korosif pada Baja.....	17
<b>GAMBAR 2.12.</b> Mekanisme Keausan Korosif.....	17
<b>GAMBAR 2.13.</b> Hipotesis Model Partikel Setengah Bola yang Bergesekan pada Saat <i>Sliding</i> .....	18

<b>GAMBAR 2.14.</b> Model Keausan Abrasif oleh Identor Berbentuk Kerucut.....	20
<b>GAMBAR 2.15.</b> Gesekan dengan Menggunakan Pelumasan.....	23
<b>GAMBAR 2.16.</b> Pola <i>stick-slip</i> pada beberapa pembebanan.....	23
<b>GAMBAR 2.17.</b> menunjukkan kurva <i>stick-slip</i> dengan pembebanan yang berbeda.....	24
<b>GAMBAR 2.18.</b> Kurva <i>stick-slip</i> dengan kecepatan yang berbeda.....	25
<b>GAMBAR 2.19.</b> Model Pengujian yang Dilakukan Solichin.....	28
<b>GAMBAR 2.20.</b> Grafik Hubungan <i>Spesific Wear Rate</i> dengan <i>Load</i> pada Dua <i>Speed Control</i> yang Berbeda Kondisi Lubrication.....	29
<b>GAMBAR 2.21.</b> Grafik Hubungan <i>Specific Wear Rate</i> Antara <i>Dry Sliding</i> Dengan <i>Lubrication</i> Pada Kecepatan 0,13 m/s.....	29
<b>GAMBAR 2.22.</b> Model Pengujian yang Dilakukan Hasry.....	30
<b>GAMBAR 2.23.</b> Hasil Penelitian Hasry untuk Pengujian <i>Dry Sliding</i> dan <i>Wet Sliding</i> .....	31
<b>GAMBAR 2.24.</b> Hasil Penelitian Hasry untuk Perbandingan Keausan antara <i>Uni-Directional</i> dengan <i>Multi-Directional Contact Friction</i> .....	32
<b>GAMBAR 2.25.</b> Model Pengujian yang Dilakukan Dewi.....	33

<b>GAMBAR 2.26.</b> Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 1,7 sampai 6,9 rpm/rpm.....	34
<b>GAMBAR 2.27.</b> Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 7 sampai dengan 10,5 rpm/rpm.....	34
<b>GAMBAR 2.28.</b> Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 10,8 sampai dengan 61,5 rpm/rpm.....	35
<b>GAMBAR 3.1.</b> Analisa Kinematika Titik yang Akan Dipantau Daerah yang Terkena <i>Stick-slip</i> .....	40
<b>GAMBAR 3.2.</b> Form pada Microsof Visual Basic .....	42
<b>GAMBAR 3.3.</b> Pembuatan <i>Command Button</i>	
<b>GAMBAR 3.4..</b> <i>Propertiesbox</i> .....	43
<b>GAMBAR 3.5.</b> <i>Project 1</i> .....	44
<b>GAMBAR 3.6.</b> <i>Form 1</i> .....	45
<b>GAMBAR 3.7.</b> Grafik Perhitungan Gesekan Antara Pin dan Disk .....	52
<b>GAMBAR 4.1.</b> Pola Lintasan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 1 .....	54
<b>GAMBAR 4.2.</b> Vektor Kecepatan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 1 .....	54
<b>GAMBAR 4.3.</b> Mapping pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 1 .....	55

<b>GAMBAR 4.4.</b> Pola Lintasan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 3 .....	56
<b>GAMBAR 4.5.</b> Vektor Kecepatan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 3 .....	57
<b>GAMBAR 4.6.</b> Mapping pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 3 .....	57
<b>GAMBAR 4.7.</b> Pola Lintasan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	58
<b>GAMBAR 4.8.</b> Vektor Kecepatan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	59
<b>GAMBAR 4.9.</b> Mapping Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	59
<b>GAMBAR 4.10.</b> Pola Lintasan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 4 .....	60
<b>GAMBAR 4.11.</b> Vektor Kecepatan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	61
<b>GAMBAR 4.12.</b> Mapping Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	61
<b>GAMBAR 4.13.</b> Pola Lintasan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 23 .....	62
<b>GAMBAR 4.14.</b> Vektor Kecepatan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 23 .....	63



<b>GAMBAR 4.15.</b> Mapping Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 24 .....	63
<b>GAMBAR 4.16.</b> Grafik Perbandingan kecepatan Vektor vs Radius Pin Berdasarkan Rasio Kecepatan .....	64
<b>GAMBAR 4.17</b> Fenomena <i>Multi-Directional Friction</i> Pada 1 Lintasan.....	69
<b>GAMBAR 4.18.</b> Vektor Kecepatan <i>Multi-Directional Friction</i> .....	69
<b>GAMBAR 4.19</b> Fenomena <i>Stick-slip</i> Sepanjang Lintasan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk sebesar 4 .....	70
<b>GAMBAR 4.20</b> Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 4, dengan Pembesaran (a) 5x dan (b) 20x. Kurnia [13].....	72

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan arah x 0-3,14 radian .....	67
<b>Tabel 4.2</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan arah x 3,336-6,28 radian .....	67
<b>Tabel 4.3</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan arah y 0 – 3,14 radian .....	67
<b>Tabel 4.4</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan arah y 3,14-6,28 radian .....	68
<b>Tabel 4.5</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan resultan 0-3,14 radian .....	68
<b>Tabel 4.6</b> Tabel perhitungan vektor kecepatan resultan 3,14-6,28 radian.....	68



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Dalam kehidupan sehari-hari, tentu sangat tidak asing dengan penggunaan peralatan. Setiap peralatan yang bergerak selalu mengalami kerusakan akibat adanya gaya yang terdapat dari benda padat yang mempunyai kontak. Gaya yang ditimbulkan oleh dua benda yang bergesekan dan arahnya berlawanan disebut gaya gesek. Gaya gesek atau *friction* yang terjadi pada benda padat terdiri dari dua jenis, yaitu gaya gesek statis dan gaya gesek kinetis. Jika benda yang mengalami kontak tidak mengalami pergerakan, maka gesekannya disebut gesekan statis. Jika gaya yang dikerjakan cukup untuk menggerakkan benda maka geraknya disebut dengan gaya kinetis. Gesekan tersebut adalah *stick-slip friction*. *Stick-slip friction* juga terjadi ketika gerakan suatu benda mencapai kecepatan nol atau diam seketika kemudian bergerak kembali. Salah satu contoh fenomena *stick-slip friction* dalam kehidupan sehari-hari adalah bunyi yang timbul pada pintu ketika bergesekan dengan lantai saat hendak digerakkan dan suara yang timbul ketika dawai bergesekan dengan senar biola.

Gesekan dapat bermanfaat atau merugikan. Sepatu olahraga telapaknya dibuat kasar sehingga pengguna sepatu tersebut tidak mudah terpeleset merupakan salah satu contoh bahwa gesekan dapat bermanfaat. Namun, gesekan dapat juga merugikan karena gesekan menyebabkan kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda atau disebut dengan keausan. Keausan yang lebih besar akan terjadi pada benda yang kekerasannya lebih rendah. Berbagai faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan gerak, besar beban, profil permukaan serta kekerasan (*hardness*) dari

material tersebut. Gesekan antar permukaan juga menimbulkan panas yang juga mempengaruhi laju keausan. Dampak dari gesekan antara dua material bisa dikurangi dengan memberikan pelumasan yang tepat pada permukaan benda yang mengalami kontak.

*Stick-slip friction* dapat menimbulkan keausan yang besar. Namun, penelitian-penelitian terkait keausan akibat *stick-slip friction* masih jarang dilakukan. Sedangkan fenomena *stick-slip friction* tidak jarang ditemui dan dampak dari fenomena tersebut dapat menimbulkan kerusakan yang besar. Fenomena ini sangat sering terjadi pada gesekan dengan kontak searah maupun gesekan dengan kontak banyak arah. Aplikasi gesekan dengan kontak banyak arah (*multi-directional*) salah satunya yaitu pada sendi lutut buatan. Pada sendi lutut buatan, terdapat *ball joint* dengan material *stainless steel* yang bergerak dengan kontak banyak arah dan bergesekan dengan tempurung yang terbuat dari material UHMWPE. Untuk itulah perlu dilakukan penelitian terkait keausan yang dipengaruhi oleh *stick-slip friction* akibat gesekan dengan kontak banyak arah (*multi-directional*)

Sejauh ini penelitian yang dilakukan berupa pengujian langsung dengan menggunakan alat tribometer. Oleh sebab itu tugas akhir ini dibuat agar mempermudah dalam memprediksi daerah-daerah yang akan mengalami gesekan tanpa harus dilakukannya pengujian secara langsung.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana cara mengetahui daerah atau luasan permukaan benda yang akan mengalami fenomena *stick-slip* akibat adanya *multi-directional contact*.

### **1.3. Batasan Masalah**

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Variabel pengujian yang digunakan adalah rasio kecepatan antara kecepatan putar pin terhadap kecepatan putar disk.
2. Putaran pin dan disk dianggap konstan.
3. Pembebanan (*load*) pada pin dianggap *uniform*.
4. Jarak tempuh lintasan pada setiap putaran pin diabaikan.
5. Pengaruh perubahan temperatur yang terjadi selama kontak diabaikan.
6. Pemrograman dilaksanakan sesuai dengan alat tribometer yang ada di laboratorium Mekanika Benda Padat Jurusan Teknik Mesin ITS.

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah melakukan permodelan pemrograman daerah *stick-slip* pada *multi-directional contact friction*.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

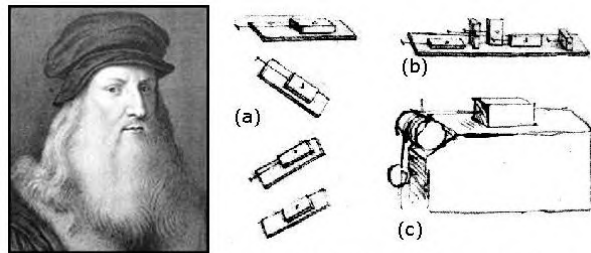
Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat memprediksi umur dari dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesekan.
2. Dapat menentukan solusi yang tepat untuk mengurangi keausan yang terjadi pada dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesekan.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1. Gesekan (*Friction*)

Leonardo Da Vinci (1452 – 1519) adalah orang pertama yang melakukan studi kuantitatif pada masalah gesekan. Eksperimen yang dilakukan adalah meletakkan balok pada bidang datar dan memberikan beban yang digantungkan untuk membuat balok tersebut bergerak *sliding* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut ini :



*Ash sketches dari percobaan pada Leonardos gesekan.*

**Gambar 2.1** Sketsa percobaan gesekan oleh Leonardo Da Vinci (a) Balok (b) Balok pada bidang datar (c) Balok pada bidang miring (*Wikipedia.org*).

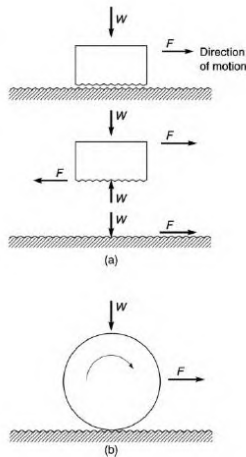
Dengan metode ini, Da Vinci hanya mampu mengukur gesekan statis dan kemungkinan besar dia tidak menyadari perbedaan antara gesekan statis dan kinetik Da Vinci menemukan dua hukum gesekan, yaitu :

1. Gesekan yang ditimbulkan oleh beban yang sama akan memiliki nilai resistansi yang sama pada awal balok bergerak walaupun balok memiliki panjang dan lebar yang berbeda.

2. Gaya gesekan akan menjadi dua kali lipat apabila massa juga dibuat dua kali lipat.

Maka, dapat disimpulkan bahwa gesekan adalah gaya yang memiliki arah berlawanan dengan gerak benda atau arah kecenderungan benda untuk bergerak (skema ilustrasi pada Gambar 2.2.). Besar dari gesekan dideskripsikan dalam sebuah istilah yaitu koefisien gesek. Koefisien gesek tersebut pada umumnya diasumsikan konstan dan spesifik untuk setiap material. Terdapat dua macam gesekan yang utama, yaitu *dry friction* dan *fluid friction*. *Dry friction* atau biasa disebut dengan “*Coulomb*” *friction* merupakan komponen tangensial dari gaya kontak yang terjadi pada dua permukaan kering yang bergerak atau akan bergerak relatif satu sama lain. *Fluid friction* merupakan komponen tangensial dari gaya kontak yang terjadi antara lapisan yang berdampingan pada suatu fluida bergerak dengan kecepatan relatif yang berbeda antara satu sama lain, sebagai contoh pada suatu cairan atau gas adalah antara permukaan-permukaan bantalan.





**Gambar 2.2.** Skema ilustrasi mengenai (a) sebuah benda yang meluncur pada sebuah permukaan yang digambarkan dengan *free body diagram*, dan (b) sebuah benda yang berputar pada sebuah permukaan horizontal;  $W$  adalah beban normal (gaya) dan  $F$  adalah gaya gesek.

Pada kontak yang terjadi antara dua benda padat, besar dari gaya tangensial yang dibutuhkan untuk memulai gerak disebut dengan gaya gesek statis,  $F_{static}$  atau  $F_s$ . Pada saat terjadinya gaya gesek statis tersebut, dibutuhkan sekitar beberapa milidetik sebelum gerak relatif akan terjadi pada kedua permukaan. Gaya tangensial yang dibutuhkan untuk mempertahankan gerak relatif disebut dengan gaya gesek kinetis (atau dinamik). Gabungan antara kedua gaya gesek tersebut dikenal dengan *stick-slip friction*.

Dua hukum dasar mengenai gesekan secara konvensional pada umumnya dapat digunakan dalam aplikasi yang cukup luas. Hukum pertama menyatakan

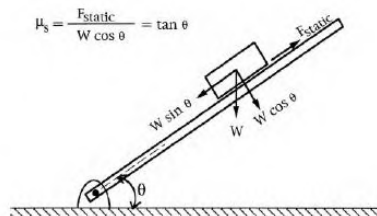
bahwa gaya gesek,  $F$ , merupakan proporsional secara langsung dengan besar dari beban,  $W$ . Secara matematis dapat dituliskan seperti pada persamaan 2.1. berikut,

$$F = \mu W \quad (2.1)$$

dimana  $\mu$  (dapat juga didefinisikan sebagai  $f$ ) merupakan suatu konstanta yang dikenal dengan koefisien gesek statis ( $\mu_s$ ) atau gesek kinetis ( $\mu_k$ ) yang berdasarkan perumusan pada persamaan (2.1) menyatakan bahwa konstanta tersebut independen terhadap beban normal. Kemudian, untuk menentukan besaran dari koefisien gesek statis ( $\mu_s$ ) digunakan perumusan yang terdapat pada persamaan 2.2. berikut,

$$\mu_s = \tan \theta \quad (2.2)$$

Pada persamaan 2.2. tersebut,  $\theta$  merupakan sudut dari sebuah beban dengan massa berapapun yang ditempatkan pada sebuah bidang miring dengan sudut dari sumbu horizontal kurang dari  $\theta$  maka beban tersebut akan tetap atau statis. Sedangkan jika besar sudut bidang miring dengan sumbu horizontal mencapai  $\theta$ , maka beban tersebut akan mulai meluncur turun. Fenomena tersebut digambarkan pada Gambar 2.3. sebagai berikut :

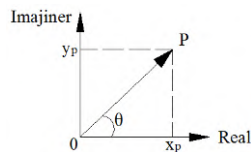


**Gambar 2.3.** *Force Equilibrium Diagram* pada sebuah beban yang ditempatkan pada bidang miring.

Hukum dasar kedua mengenai gesekan menyatakan bahwa gaya gesek (atau koefisien gesek) adalah independen terhadap area kontak antara benda yang bergesekan. Namun, hal tersebut berlaku apabila koefisien gesek kedua benda sama walaupun ukuran fisiknya berbeda. Selain kedua hukum tersebut, terkadang hukum ketiga perlu ditambahkan yaitu teori yang dikemukakan oleh Coulomb (1785). Coulomb menyatakan bahwa gaya gesek kinetis adalah independen terhadap kecepatan geser setelah pergerakan dimulai.

Analisa kinematika yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Sebuah titik P digambarkan pada sebuah koordinat kompleks



Secara kinematika dapat disebutkan bahwa

$$\bar{p} = x_p + iy_p$$

Dimana:  $x_p = R \cos \theta$

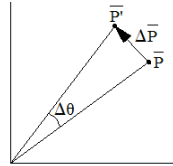
$y_p = R \sin \theta$  , dengan  $R$  adalah panjang  $\bar{p}$

Sehingga:  $\bar{p} = R \cos \theta + R \sin \theta$

$$\bar{p} = R (\cos \theta + i \sin \theta)$$

$$\bar{p} = R e^{i\theta}$$

Jika titik P mengalami perpindahan posisi yang begitu kecil, maka :



$$\vec{p}' = \vec{p} + \Delta \vec{p}$$

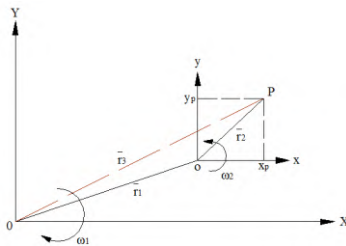
$$\Delta \vec{p} = \vec{p}' - \vec{p}$$

Dikarenakan perpindahan titik P dalam waktu yang begitu singkat, maka kecepatan perpindahan titik P dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{d}{dt} (\vec{p}) = \frac{d}{dt} (R e^{i\theta})$$

$$\dot{\vec{p}} = \dot{R} e^{i\theta} + R i \omega e^{i\theta}$$

Ketika titik P berada pada koordinat lokal xoy, sedangkan koordinat lokal tersebut berada pada koordinat global XOY, maka titik P dapat digambarkan sebagai berikut :



$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$$

$$\vec{r}_3 = R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2}$$

$$\begin{aligned}x &= R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2 \\y &= R_1 \sin \theta_1 + R_2 \sin \theta_2 \\&\dots\dots\dots(2.1)\end{aligned}$$

Sehingga, titik P pada koordinat global adalah sebagai berikut:

$$\overline{p} = \overline{r}_3 = R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2}$$

Sehingga

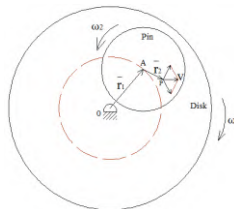
$$\dot{\overline{p}} = \frac{d\overline{r}_3}{dt} = iR_1\omega_1 e^{i\theta_1} + iR_2\omega_2 e^{i\theta_2}$$

$$\begin{aligned}\dot{\overline{p}} &= iR_1\omega_1(\cos \theta_1 + i.\sin \theta_1) + iR_2\omega_2(\cos \theta_2 \\&\quad + i.\sin \theta_2) \\(v_x + iv_y) &= iR_1\omega_1 \cos \theta_1 - R_1\omega_1 \sin \theta_1 \\&\quad + iR_2\omega_2 \cos \theta_2 - R_2\omega_2 \sin \theta_2\end{aligned}$$

Jika komponen  $v_x$  dan  $v_y$  dipisah, maka:

$$\begin{aligned}v_x &= -R_1\omega_1 \sin \theta_1 - R_2\omega_2 \sin \theta_2 \\v_y &= R_1\omega_1 \cos \theta_1 + R_2\omega_2 \cos \theta_2 \dots\dots\dots(2.2)\end{aligned}$$

Pada penelitian ini, jika koordinat lokal diwakili oleh pin dan koordinat global diwakili oleh disk, maka dapat digambarkan sebagai berikut:



Dengan  $\omega_2 = \omega \text{ pin (ccw)}$ ;  $\omega_1 = \omega \text{ disk (cw)}$

Lintasan yang dilewati titik P sepanjang waktu digambarkan pada disk dengan berbagai perbandingan  $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega \text{ pin}}{\omega \text{ disk}}$

## 2.2. Keausan (*wear*)

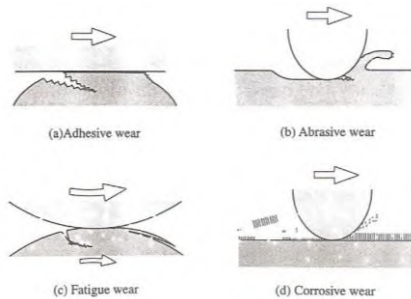
Keausan (*Wear*) adalah kerusakan pada permukaan atau hilangnya material dari satu atau kedua permukaan benda padat pada saat terjadi gesekan, perputaran atau efek dari gerakan relatif antara satu sama lain. Pada umumnya, keausan terjadi antara permukaan yang berinteraksi pada *asperities*. *Asperities* merupakan istilah yang dikenalkan oleh Coulomb yang mempunyai makna berupa ketidakraturan mikroskopis pada permukaan. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap aksi mekanis (gesekan). Akibat negatif yang ditimbulkan adalah ketahanan (*durability*) dan kehandalan (*reliability*) dari benda yang aus akan berkurang karena perubahan dimensi dari benda tersebut.

### 2.2.1. Mekanisme Keausan (*Wear Mechanism*)

Terdapat 4 mekanisme terjadinya keausan yang secara umum dianggap sebagai dasar dan utama, yaitu:

1. Keausan adhesif (*Adhesive wear mechanism*).
2. Keausan abrasif (*Abrasive wear mechanism*).
3. Keausan lelah (*Fatigue wear mechanism*).
4. Keausan korosif (*Corrosive wear mechanism*).

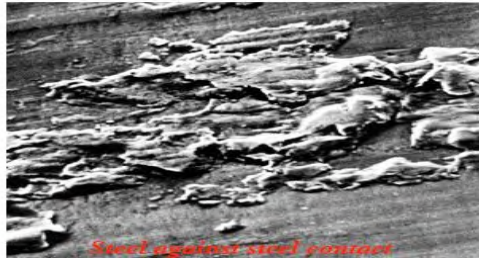
Skema gambar dari keempat mekanisme keausan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4. berikut :



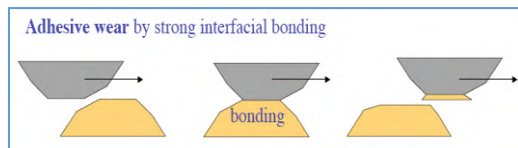
**Gambar 2.4.** Skema Gambar dari 4 Mekanisme Keausan

1. Keausan Adhesif (*Adhesive Wear Mechanism*)

Keausan adhesif terjadi bila kontak permukaan dari material mengakibatkan adanya perekatan (*adhesive*) antara satu sama lain. Bila tekanan normal sedang diterapkan, tekanan lokal di *asperities* akan menjadi sangat tinggi. Seringkali tekanan lokal tersebut melampaui tegangan luluh material sehingga menyebabkan terjadinya deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pengikatan (*bonding*) permukaan material yang satu oleh yang lain. Jika sifat adhesi dari material lebih tinggi dari sifat kohesinya, akan terjadi pengurangan materi pada permukaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan mekanismenya pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.5.** Pengamatan *Micrographs* Keausan Adhesif



**Gambar 2.6.** Mekanisme Keausan Adhesif

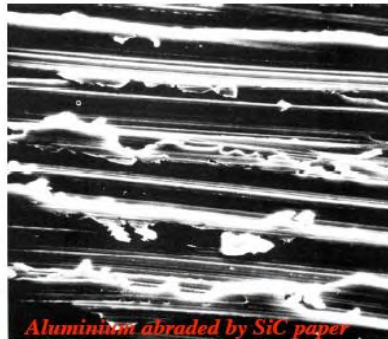
Faktor yang menyebabkan terjadinya keausan adhesif antara lain kontaminasi permukaan dan terjadinya ikatan (*bonding*) antar molekul pada material, yaitu ikatan ion, kovalen, ikatan logam, atau ikatan *van der Waals* dari material yg bergesekan.

## 2. Keausan Abrasif (*Abrasive Wear Mechanism*)

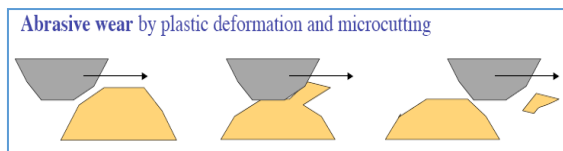
Keausan abrasif terjadi bila suatu partikel keras dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan oleh *asperities* dari material yang lebih keras terhadap material yang lebih lunak. Keausan abrasif juga dapat terjadi karena adanya partikel kecil yang terperangkap pada permukaan material, sementara kekerasan partikel tersebut lebih tinggi dari kekerasan permukaan material. Salah satu bentuk keausan abrasif seperti



diperlihatkan pada Gambar 2.7, sedangkan mekanisme keausannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. berikut :



**Gambar 2.7.** Pengamatan *Micrographs* Keausan Abrasif



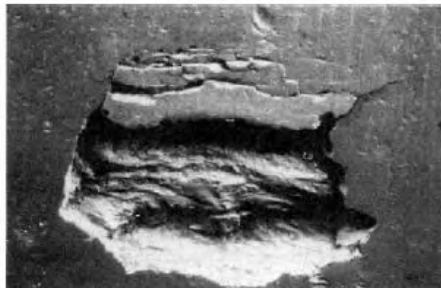
**Gambar 2.8.** Mekanisme Keausan Abrasif

Faktor yang mempengaruhi keausan abrasif antara lain kekasaran permukaan dan perbedaan kekerasan material yang bergesekan

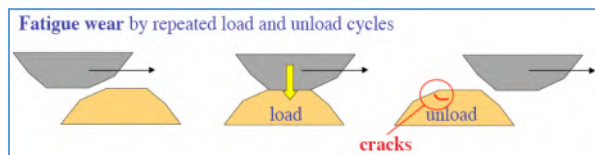
### 3. Keausan Lelah (*Fatigue Wear Mechanism*)

Keausan lelah pada material disebabkan pemberian beban secara berulang selama terjadinya gesekan antar permukaan material. *Fatigue* hanya akan terjadi jika beban yang diterima material lebih

besar dari *fatigue strength* dari material itu sendiri. Keausan lelah diawali dengan pembentukan retak-retak mikro pada permukaan (*surface*) material dan kemudian menyebar ke bawah permukaan (*subsurface*). Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya akan menyatu dan menyebabkan terjadinya pengelupasan material. Gambar 2.9. menunjukkan kegagalan lelah yang terjadi pada *ball bearing* dan Gambar 2.10. menunjukkan mekanisme dari keausan lelah.



**Gambar 2.9.** Keausan Lelah pada *Ball Bearing*

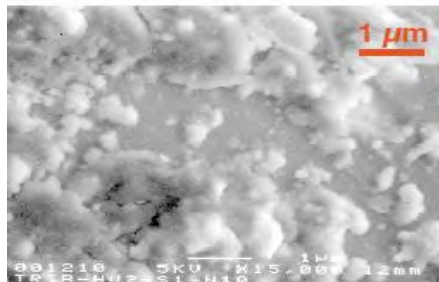


**Gambar 2.10.** Mekanisme Keausan Lelah

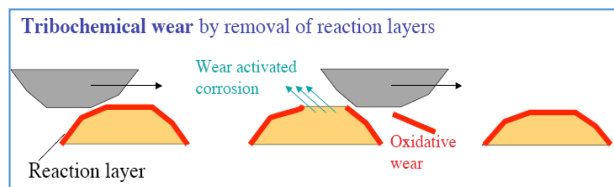
Faktor yang mempengaruhi keausan lelah antara lain besar tegangan, jumlah pengulangan pembebanan dan sifat ketahanan lelah dari material itu sendiri.

#### 4. Keausan Korosif (*Corrosive Wear Mechanism*)

Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan interface antara lapisan permukaan yang terbentuk dan material induk saat terjadi gesekan antar permukaan benda padat. Pada akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut. Pada Gambar 2.11. dapat dilihat permukaan baja yang mengalami keausan korosif sedangkan Gambar 2.12. menunjukkan mekanisme keausan korosif.



**Gambar 2.11.** Keausan Korosif pada Baja



**Gambar 2.12.** Mekanisme Keausan Korosif

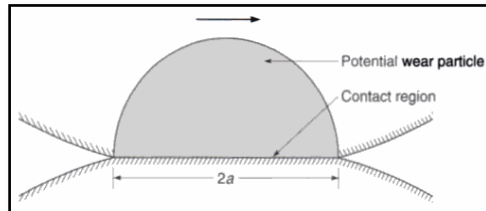
### 2.2.2. Metode Menghitung Volume yang Tergerus

Terdapat 2 metode yang dapat digunakan dalam menghitung volume yang tergerus, yakni metode keausan adhesif dan metode keausan abrasif.

#### 1. Metode Keausan Adhesif

Gambar 2.12 adalah gambar hipotesis model permukaan partikel dua material yang sedang mengalami gesekan pada saat *sliding*. Jika diasumsikan titik kontak  $n$  dan total jumlah titik kontak konstan selama *sliding*, dengan asumsi radius partikel  $a$  seperti pada Gambar 2.13, maka volume keausan dari partikel yang berbentuk setengah bola adalah:

$$\frac{1}{2} \cdot \text{volume bola} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a^3 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3 \dots\dots(2.3)$$



**Gambar 2.13.** Hipotesis Model Partikel Setengah Bola yang Bergesekan pada Saat *Sliding*

Berdasarkan asumsi diatas, volume keausan  $V$  untuk  $n$  titik kontak setelah menempuh *sliding distance*  $L$ , maka dapat dirumuskan:

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3 \cdot \frac{L}{2a} \quad (2.4)$$

Karena tekanan kontak dalam kondisi deformasi plastis sama dengan nilai kekerasan (*hardness*)  $H$  dari material yang aus dan beban normal  $F$  diberikan pada material, maka luasan total kontak dapat dinyatakan :

$$n \cdot \pi \cdot a^2 = \frac{F}{H} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.4) pada persamaan (2.5) akan diperoleh:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) menunjukkan bahwa volume keausan adhesif proporsional dengan beban normal dan *sliding distance*, tetapi tidak proporsional dengan kekerasan dari material.

Untuk mengakomodasi semua variabel, parameter  $K_{ad}$  diperkenalkan sebagai pengubah, sehingga volume keausan menjadi :

$$V = k_{ad} \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) biasa disebut sebagai persamaan archard, dimana  $K_{ad}$  disebut koefisien keausan untuk keausan adesif, secara fisik  $K_{ad}$  adalah fraksi volume keausan pada daerah kontak plastis. Untuk material logam, koefisien gesekan  $K_{ad}$  bervariasi diantara  $10^{-7}$  hingga  $10^{-2}$  tergantung kondisi operasional dan *properties* material (Archard, 1953; Hirst, 1957).

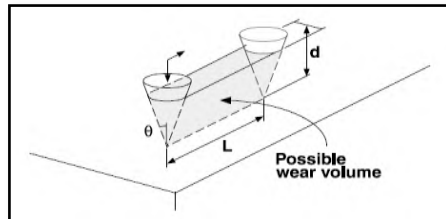
Dalam *text book "Friction, wear, Lubrication"* oleh Kenneth C Ludema persamaan Archard dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi = k \cdot \frac{W \cdot v}{H} \quad (2.8)$$

$\Psi$  adalah *time rate of wear* atau *wear rate* dengan satuan  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $W$  adalah beban dengan satuan  $\text{N}$ ,  $v$  adalah *sliding speed* dengan satuan  $\text{m/s}$ ,  $H$  adalah *hardness* material dengan satuan  $\text{Pa}$ , sedangkan  $k$  adalah *wear coefficient* tanpa satuan.

## 2. Metode Keausan Abrasif

Untuk mengetahui volume keausan material yang ditimbulkan oleh keausan abrasif, diasumsikan sebuah model kontak berbentuk kerucut bersudut  $\theta$  dan kedalaman indentasi abrasif  $d$  seperti ditunjukkan pada gambar 2.14. berikut.



**Gambar 2.14.** Model Keausan Abrasif oleh Identor Berbentuk Kerucut

Berdasarkan model, volume keausan  $V$  yang disebabkan identor setelah menempuh *sliding distance* sejauh  $L$  adalah :

$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L \quad (2.9)$$

Karena tekanan normal kontak pada kondisi plastis diasumsikan nilai *hardness*  $H$  dari material

yang aus dan luasan kontak  $\pi.(d.\tan \theta)^2/2$  dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (d. \tan \theta)^2 = \frac{W}{H} \quad (2.10)$$

Substitusi persamaan (2.9) kedalam persamaan (2.10) diperoleh volume keausan  $V$  sebagai berikut :

$$V = \frac{2}{\pi \cdot \tan \theta} \cdot \frac{W \cdot L}{H} \quad (2.11)$$

Untuk mengakomodasi semua variabel, parameter  $K_{ab}$  diperkenalkan sebagai pengubah, sehingga volume keausan menjadi :

$$V = k_{ab} \cdot \frac{W \cdot L}{H} \quad (2.12)$$

Keausan abrasif untuk logam bervariasi antara  $10^{-4}$  dan  $10^{-1}$  (Rabinowicz, 1980) tergantung kondisi kontak dan *properties* material.

### 2.2.3. Menghitung Laju Keausan

Dalam mendeterminasikan keausan, teknik pengukuran yang berbeda dapat digunakan. Hal tersebut disebabkan oleh volume keausan,  $V$ , yang dapat diasumsikan merupakan fungsi dari *sliding distance*,  $L$ , kekerasan dari material yang lebih lunak,  $H$ , pembebanan yang diberikan,  $W$ , dan *sliding velocity*,  $\tilde{V}$  (persamaan 2.13).

$$V = f(L, W, H, \tilde{V}) \quad (2.13)$$

Berdasarkan standar German DIN 50321, “*Wear-quantities*”, keausan dapat dideteksi dengan mengukur secara langsung kuantitas keausan, yaitu dengan mengukur:

- a. Perubahan geometri pada spesimen:
  - 1) Perubahan pada dimensi secara linier
  - 2) Perubahan pada *cross-sections*
  - 3) Perubahan pada volume
- b. Perubahan massa pada spesimen
- c. Jumlah dari *worn material-loss*  
 Atau dengan mengukur kuantitas keusan secara relatif, yaitu *wear rates* sebagai berikut:
  - d. *The wear-time-ratio (wear velocity)*
  - e. *The wear-distance-ratio*  
 Atau dengan mengukur *wear coefficient* yang didefinisikan sebagai berikut:
    - f. 
$$K' = \frac{\text{wear volume}}{\text{load} \cdot \text{distance}} \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right)$$

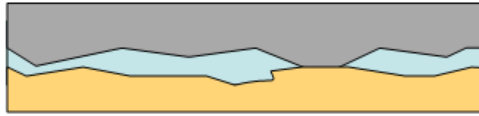
(2.14)
 Atau dengan mengukur *dimensionless Archard's wear coefficient* yang didefinisikan sebagai berikut:
    - g. 
$$K = \frac{\text{wear volume} \cdot \text{hardness}}{\text{load} \cdot \text{distance}}$$

(2.15)

### 2.3. Pelumasan

Pelumasan adalah tindakan menempatkan pelumas antara permukaan yang saling bergeser untuk mengurangi keausan dan friksi. Ketika kita memberikan pelumas cair di antara permukaan yang saling bergesekan, maka pelumas tersebut akan cenderung untuk mengisi kesenjangan antar *asperities* (seperti pada Gambar 2.15) dan bertindak sebagai bantalan cairan untuk memperhalus pergerakan dari keduanya. Hal ini tentunya akan mengurangi gaya gesekan daripada gerakan tanpa pelumasan.



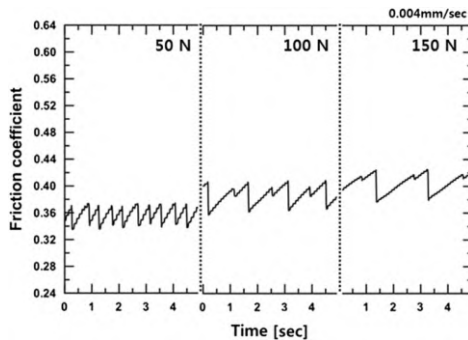


**Gambar 2.15.** Gesekan dengan Menggunakan Pelumasan

Ada tiga jenis pelumasan yaitu pelumasan oleh lapisan cairan (*Fluid-film*), pelumasan batas (*Boundary Lubrication*), dan pelumasan padat (*Solid Lubrication*).

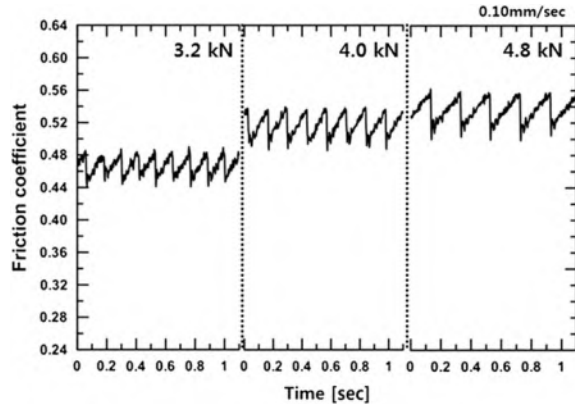
## 2.4. Teori *Stick-slip*

*Stick-slip* selama sliding dapat dianalisa pada saat kondisi pembebanan dan juga pada bagian luar permukaan. Hal ini dapat dilihat karena amplitude dan frekuensi *stick-slip* cenderung menentukan kerusakan secara perlahan. Pada gambar 2.16 menunjukkan grafik osilasi selama terjadinya sliding, hal tersebut memperlihatkan pola yang khas pada *stick-slip*.



**Gambar 2.16** Pola *stick-slip* pada beberapa pembebanan.

Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa intensitas dari *stick-slip* meningkat terhadap fungsi dari beban sedangkan frekuensinya menurun.



**Gambar 2.17** menunjukkan kurva *stick-slip* dengan pembebanan yang berbeda

Pada gambar 2.17 menunjukkan bahwa kurva *stick-slip* memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan beban. Hal dapat dilihat dari jumlah periode kurva *stick-slip* yang terjadi pada masing-masing pembebanan, pada saat beban 3.2 kN kurva *stick-slip* yang diperoleh lebih banyak bila dibandingkan oleh pembebanan 4.8 kN. Pada pembebanan 4.8 kN dapat dilihat jumlah kurva *stick-slip* lebih rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah kurva *stick-slip* berbanding terbalik dengan fungsi pembebanan. Maka dapat dirumuskan sebagai berikut

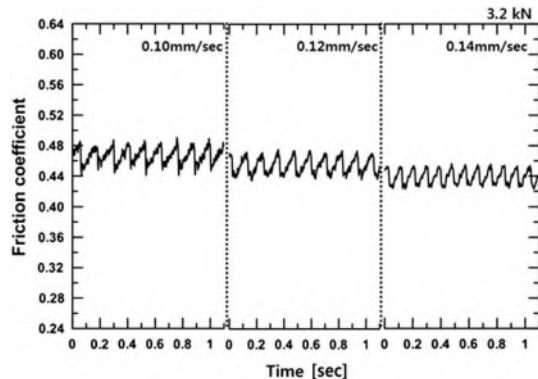
$$\mu_k = \left[ \frac{k \cdot v}{L} \right] \quad (2.16)$$

Dimana  $\mu_k$  = koefisien gesek kinetic

$v$  = kecepatan sliding

$k$  = kekakuan

$L$  = Beban



**Gambar 2.18** Kurva *stick-slip* dengan kecepatan yang berbeda

Pada gambar 2.18 menunjukkan bahwa kemiringan kurva *stick-slip* menjadi lebih curam saat kecepatan meningkat. Dari kurva *stick-slip* juga menjelaskan bahwa periode dan intensitas *stick-slip* menjadi lebih kecil dengan meningkatnya kecepatan gesek.

*Stick-slip* diketahui sebagai penyebab kerusakan secara perlahan. Fenomena *stick-slip* dapat dilihat dari osilasi gesekan pada berbagai beban yang diberikan, tingkat kecepatan dan kondisi permukaan. Sehingga dari fenomena *stick-slip* ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Bidang kontak yang diterima oleh suatu benda meningkat berbanding lurus dengan beban yang diberikan
- Tingkat keausan ditentukan oleh luasan daerah yang terkena gesekan
- Intensitas kurva *stick-slip* akan meningkat saat terjadinya peningkatan beban, tetapi kurva *stick-slip* akan menurun saat kecepatan meningkat
- Besarnya  $\Delta\mu$  pada kurva *stick-slip* dipengaruhi oleh pembebanan yang diberikan.

## 2.5. Pemrograman

Pemrograman adalah proses menulis, menguji dan memperbaiki (*debug*), dan memelihara kode yang membangun sebuah program komputer. Kode ini ditulis dalam berbagai bahasa pemrograman. Tujuan dari pemrograman adalah untuk memuat suatu program yang dapat melakukan suatu perhitungan atau 'pekerjaan' sesuai dengan keinginan si pemrogram (programmer). Untuk dapat melakukan pemrograman, diperlukan keterampilan dalam algoritma, logika, bahasa pemrograman, dan di banyak kasus, pengetahuan-pengetahuan lain seperti matematika.

Bill Gates, pendiri Microsoft, memulai bisnis perangkat lunak dengan mengembangkan interpreter bahasa basic untuk kemudian diubah agar dapat berjalan di atas IBM PC dengan sistem operasi DOS. Perkembangan berikutnya adalah diluncurkannya BASICA (*basic-advance*) untuk DOS. Setelah itu, Microsoft meluncurkan Microsoft Quickbasic dan Microsoft Basic (dikenal juga sebagai Basic Compiler).

Visual Basic adalah pengembangan dari bahasa komputer BASIC (*Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code*). Bahasa BASIC diciptakan oleh Professor John Kemeny dan Thomas Eugene Kurtz dari

Perguruan Tinggi Dartmouth pada pertengahan tahun 1960-an. Bahasa program tersebut tersusun mirip dengan bahasa Inggris yang biasa digunakan oleh para programmer untuk menulis program komputer sederhana yang berfungsi sebagai pembelajaran bagi konsep dasar pemrograman komputer. Visual Basic 1.0 dikenalkan pada tahun 1991. Konsep pemrograman dengan metode *drag-and-drop* untuk membuat tampilan aplikasi Visual Basic ini diadaptasi dari *prototype* generator *form* yang dikembangkan oleh Alan Cooper dan perusahaannya dengan nama Tripod.

Visual Basic merupakan bahasa yang mendukung Pemrograman berorientasi objek, namun tidak sepenuhnya. Beberapa karakteristik obyek tidak dapat dilakukan pada Visual Basic, seperti *Inheritance* tidak dapat dilakukan pada class module, *Polymorphism* secara terbatas bisa dilakukan dengan mendeklarasikan *class module* yang memiliki *Interface* tertentu. Visual Basic (VB) tidak bersifat case sensitif.

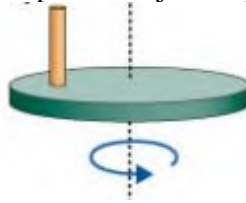
Visual Basic 6.0 (pertengahan 1998) memperbaiki beberapa cakupan, termasuk kemampuannya untuk membuat Aplikasi Web-based. Visual Basic 6 di jadwalkan akan memasuki Microsoft “fase non Supported” dimulai pada Maret 2008.

## **2.6. Penelitian Terdahulu**

### **2.6.1. Pengujian keausan *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) terhadap *stainless steel***

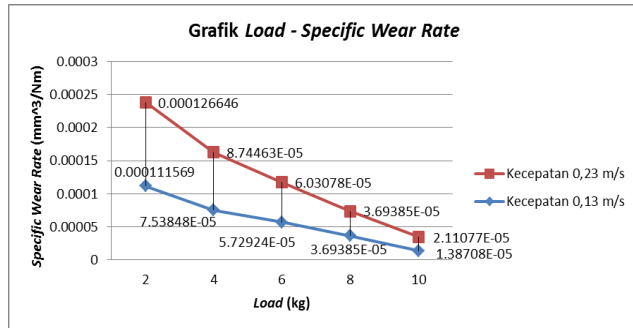
Solichin, 2012, melakukan kajian tribologi dalam tugas akhirnya yang berjudul “Studi Eksperimental Laju Keausan (*Specific Wear Rate*) Antara *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) Dengan *Stainless Steel* Sebagai Sendi Lutut Buatan (*Total Knee*

*Replacement Prosthesis*) Manusia”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *stainless steel* pada kondisi *unidirection sliding*. Model pengujian yang dilakukan Solichin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19.

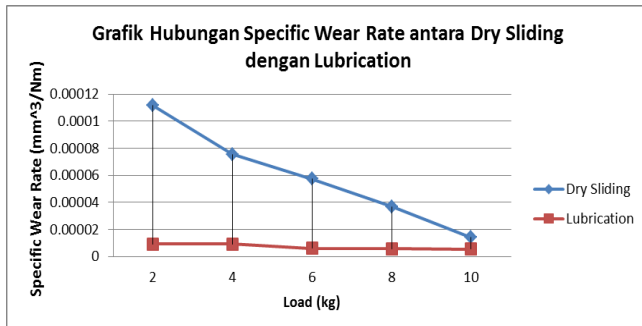


**Gambar 2.19.** Model Pengujian yang Dilakukan Solichin

Pada Gambar 2.19 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Solichin, dimana pin berwarna kuning berada dalam posisi diam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan *disk* berwarna hijau bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan dengan pelumasan (*oil lubricated*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 600 meter. Variasi kecepatan adalah 0.13 m/s dan 0.23 m/s, dan 5 variasi pembebanan adalah 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg dan 10 kg. Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Solichin.



**Gambar 2.20.** Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* dengan *Load* pada Dua *Speed Control* yang Berbeda Kondisi *Lubrication*



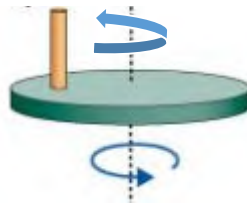
**Gambar 2.21.** Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* Antara *Dry Sliding* Dengan *Lubrication* Pada Kecepatan 0,13 m/s

Dari hasil penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20, Solichin menjelaskan bahwa *Specific Wear Rate* semakin turun seiring semakin besarnya beban yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan laju keausan berbanding terbalik dengan beban. Dari gambar tersebut

juga dapat diketahui bahwa peningkatan kecepatan akan meningkatkan laju keausan. Hal tersebut dikarenakan peningkatan kecepatan akan menyebabkan peningkatan temperatur dan peningkatan temperatur akan menyebabkan material semakin mudah terabrasi. Dari Gambar 2.21 dapat dilihat perbandingan laju keausan antara kontak tanpa pelumas dan kontak dengan pelumas. Adanya pelumas dapat memperpanjang umur UHMWPE sampai 8 kali umur kondisi *dry sliding*.

### 2.6.2. Pengujian Keausan Permukaan Material Akibat *Multi-Directional Contact Friction*

Hasry, 2013, melakukan kajian tribologi dalam tugas akhirnya yang berjudul “Studi Eksperimental Keausan Permukaan Material Akibat Adanya *Multi-Directional Contact Friction*”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *stainless steel* pada kondisi *multi-directional sliding*. Model pengujian yang dilakukan Hasry seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22.

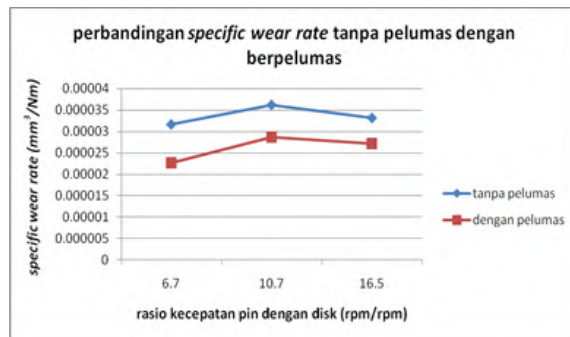


**Gambar 2.22.** Model Pengujian yang Dilakukan Hasry

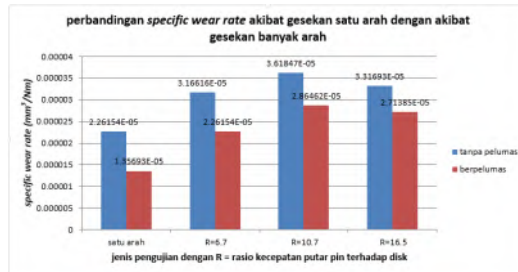
Pada Gambar 2.22. dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Hasry dimana pin berwarna kuning berputar berlawanan dengan arah jarum jam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan disk berwarna hijau



bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan pelumasan (*wet sliding*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 600 meter. Dengan pembebanan statis sebesar 39,2 N dan 3 variasi rasio kecepatan antara pin dan disk, yaitu sebesar 6.7, 10.7, dan 16.5. Spesimen yang telah diuji selanjutnya diamati struktur permukaannya menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 100 kali. Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Hasry.



**Gambar 2.23.** Hasil Penelitian Hasry untuk Pengujian *Dry Sliding* dan *Wet Sliding*.



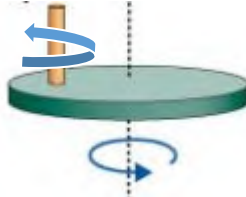
**Gambar 2.24.** Hasil Penelitian Hasry untuk Perbandingan Keausan antara *Uni-Directional* dengan *Multi-Directional Contact Friction*.

Hasil dari penelitian yang telah dilakukan Hasry menyebutkan bahwa gesekan banyak arah (*Multi-Directional Friction*) akan menghasilkan keausan yang lebih besar dibanding gesekan satu arah (*Uni-Directional Friction*). Material yang mengalami gesekan banyak arah dengan pembebanan statis sebesar 39.2 N dan dengan kecepatan sesaat yang berubah-ubah mulai dari nol sampai 19.546 m/menit, akan mengalami keausan dengan mekanisme abrasi. Berdasarkan penelitian diketahui juga bahwa adanya pelumas memberi pengaruh yang besar dalam mengurangi keausan.

### 2.6.3. Pengujian Keausan Yang Dipengaruhi Oleh *Stick-slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contact Friction*

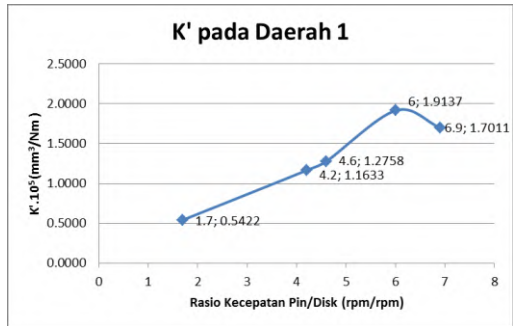
Dewi Fasholi, 2015 melakukan kajian mengenai Tribologi dalam tugas akhirnya dengan judul “Studi eksperimental dan analisa keausan permukaan yang dipengaruhi oleh *stick-slip friction* akibat *multi-directional contact friction*”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *Stainless-steel* pada kondisi *multi-*

*directional sliding*. Model pengujian yang dilakukan Dewi dapat dilihat pada gambar 2.25.

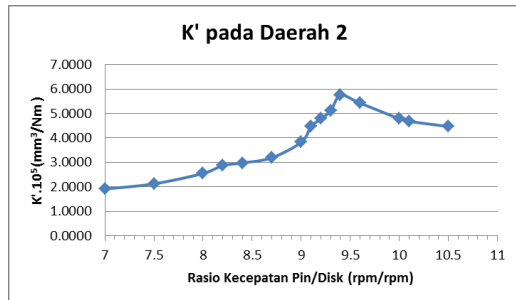


**Gambar 2.25.** Model Pengujian yang dilakukan Dewi

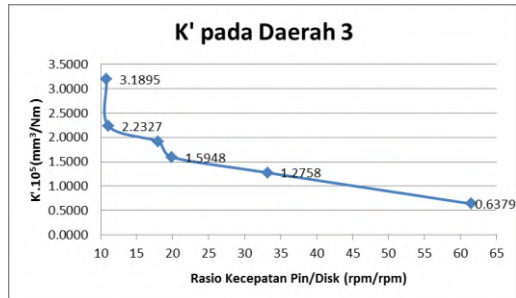
Pada gambar 2.25 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan Dewi dimana pin berwarna kuning berputar berlawanan arah dengan arah jarum jam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan disk berwarna hijau bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry slding*) dan pengujian dengan pelumasan (*wet sliding*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 850 meter. Dengan pembebanan (2Kg, 4 Kg, 6 Kg dan 8 Kg) dengan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1.7 sampai 61.5 rpm/rpm. Berikut ini adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Dewi.



**Gambar 2.26.** Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 1,7 sampai 6,9 rpm/rpm



**Gambar 2.27.** Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 7 sampai dengan 10,5 rpm/rpm



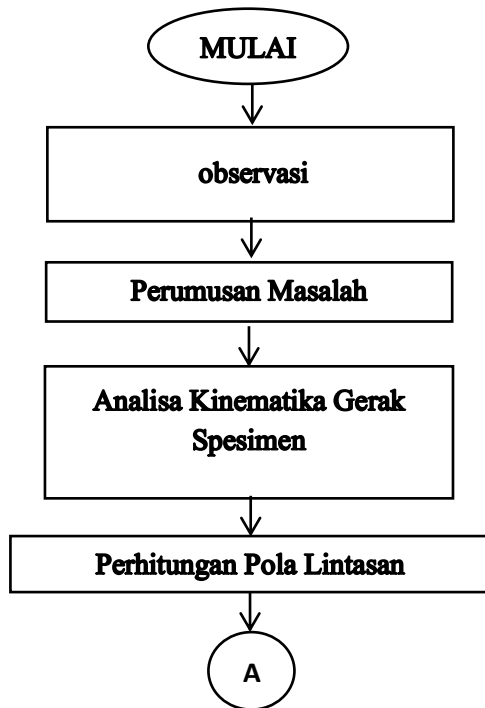
**Gambar 2.28.** Grafik Perubahan Laju Keausan ( $K'$ ) terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 10,8 sampai dengan 61,5 rpm/rpm

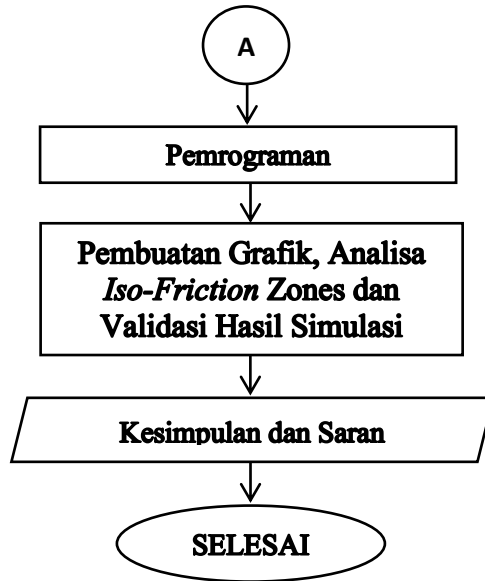
Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah terdapat tiga daerah yang dapat dikelompokkan berdasarkan rasio kecepatan antara pin dengan disk, yaitu daerah sebelum terjadi *stick-slip* (rasio 1,7-6,9 rpm/rpm), daerah rawan terjadi *stick-slip* (rasio 7-10,5 rpm/rpm), dan daerah setelah terjadi *stick-slip* (rasio 10,8-61,5 rpm/rpm). Nilai laju keausan cenderung meningkat pada rasio kecepatan 1,7 sampai dengan 9,4 rpm/rpm. Kemudian nilai laju keausan akan menurun dengan bertambahnya rasio kecepatan. Nilai laju keausan maksimal terdapat pada rasio kecepatan 9,4 dimana fenomena *stick-slip friction* kerap terjadi paling signifikan. Mekanisme keausan yang terjadi pada saat fenomena *stick-slip* terjadi adalah keausan abrasif dan adhesif.

## **BAB III METODELOGI**

### **3.1. Langkah – langkah Penelitian**

Pada penelitian ini langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian adalah pengujian secara analitis dan simulasi eksperimen, yaitu pengambilan data yang dilakukan oleh software untuk menguji data volume keausan, perhitungan untuk mendapat nilai vektor kecepatan pengamatan *mapping* permukaan dari *node* vektor kecepatan. Secara umum metodologi penelitian dapat dijabarkan pada diagram alir sebagai berikut :





Secara sistematis, langkah – langkah penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut :

### 3.1.1. Studi Literatur dan Observasi

Langkah awal dalam penelitian ini adalah studi literatur. Tujuan dilakukannya studi literatur adalah untuk membantu penulis dalam merumuskan masalah, menentukan hal – hal yang perlu dilakukan agar tidak terjadi duplikasi penelitian atau karya di masa lalu yang sudah pernah dilakukan oleh peneliti lain, serta pengkajian teori – teori yang mendukung penelitian yang akan dilakukan. Sumber yang digunakan dalam studi literatur ini adalah abstrak hasil penelitian jurnal dan buku referensi.

### **3.1.2. Perumusan Masalah**

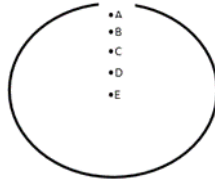
Dari studi literatur yang dilakukan dan dijadikan sebagai dasar pemikiran dalam penelitian, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang akan dianalisis secara khusus pada penelitian ini.

Fenomena *Stick-slip friction* kerap terjadi pada kecepatan tertentu pada saat dua material saling kontak dan dapat mengakibatkan keausan yang lebih besar dibandingkan pada saat tidak terjadi fenomena ini. Oleh karena itu perlu dilakukan analisa kinematika pada rasio kecepatan berapakah *stick-slip* akan terjadi dan dibuktikan dengan melihat nilai hasil uji keausan yang akan memperoleh nilai lebih besar dibandingkan dengan pada saat *stick-slip* tidak terjadi dimana nilai tersebut akan diterjemahkan dan di plot untuk mengetahui daerah-daerah yang terjadi *stick-slip* dengan yang tidak terjadi *stick-slip*.

### **3.1.3. Analisa Kinematika Gerakan Spesimen**

Pada tahap ini dilakukan analisa kinematika gerak spesimen sebagai bekal persiapan untuk pengambilan data. Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi keausan akibat gesekan banyak arah (*multi-directional contact friction*). Kemudian dari setiap analisis tersebut divariasikan besar pembebanan dan rasio kecepatannya. Besar rasio kecepatan antara pin dan disk ditentukan berdasarkan analisa kinematika gerakan spesimen. Hal tersebut dilakukan untuk memperhitungkan pada rasio kecepatan berapa fenomena *stick-slip friction* kerap terjadi.





**Gambar 3.1.** Analisa Kinematika titik yang akan dipantau daerah yang terkena *stick-slip*

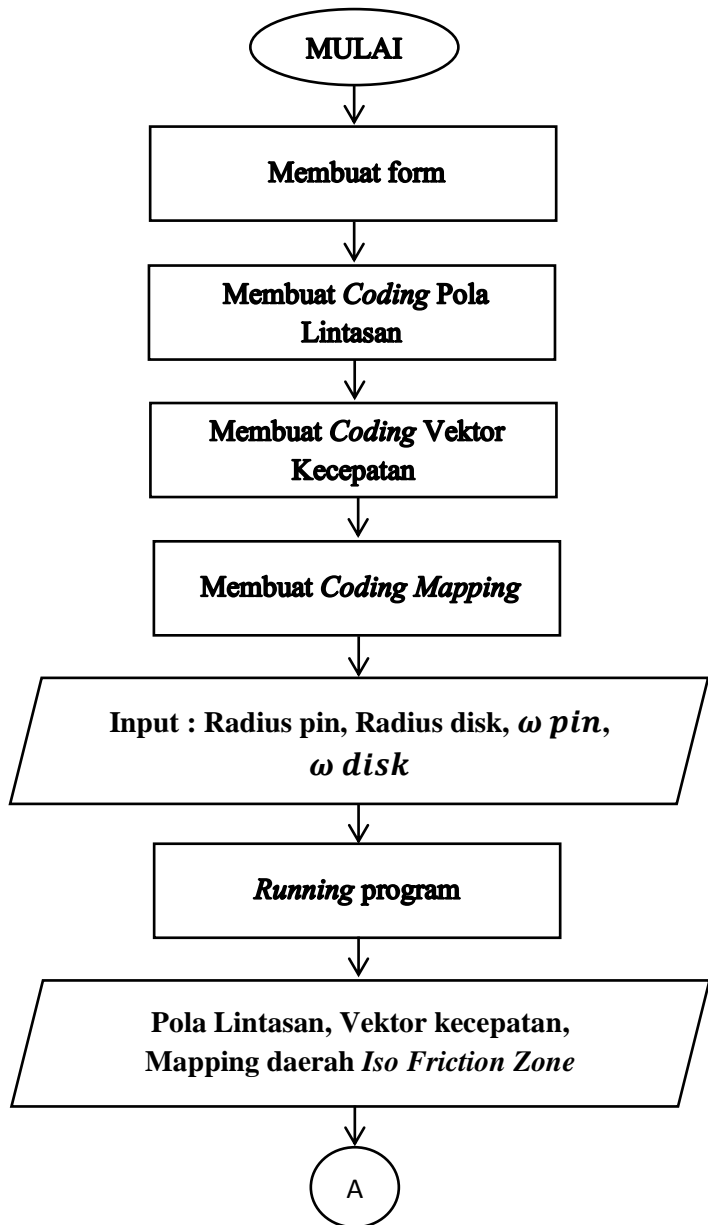
Pada gambar 3.1 digambarkan bahwa ada 5 titik yang akan dianalisa daerah yang terkena fenomena *stick-slip*. Titik-titik tersebut direncanakan akan berjarak 1 mm dari titik pusat pin ke titik terluar pin dan akan dianalisa daerah yang mengalami fenomena *stick-slip* dan daerah yang tidak mengalami fenomena *stick-slip* akibat dari *multi-directional contact*.

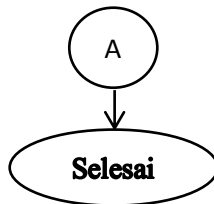
#### **3.1.4. Perhitungan Pola Lintasan**

Pola lintasan adalah jalur yang akan dilalui oleh suatu titik. Pola lintasan ini akan diperhitungkan dengan program microsoft excel dengan memasukan rumusan pada persamaan 2.1.

#### **3.1.5. Pemrograman**

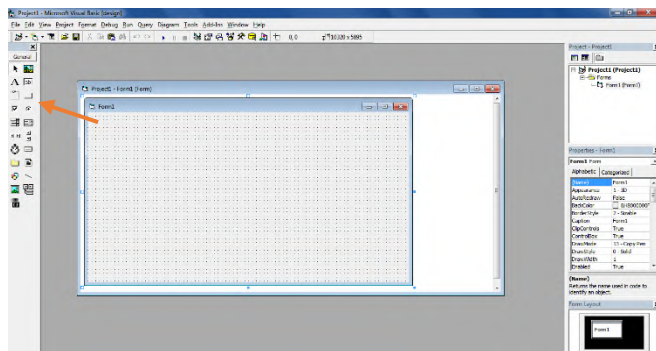
Pada tahap ini akan dilakukan pemrograman yang nantinya akan digunakan sebagai bahan pembahasan dari penelitian ini. Pengambilan data diawali dengan memasukan variabel yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi. Adapun besaran rasio kecepatan yang akan dipakai berdasarkan analisa kinematika gerak spesimen. Adapun flowchart pemrograman seperti berikut :





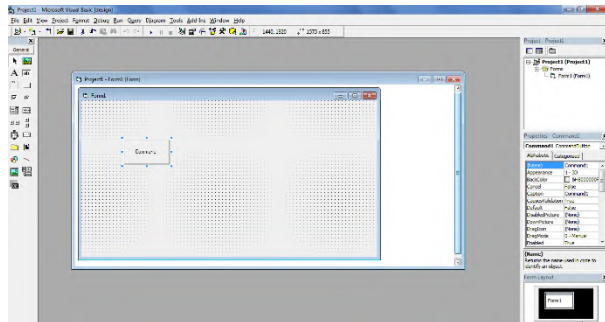
### 3.1.5.1. Form dibuat pada Microsoft Visual Basic dengan format :

Pada tahap awal pembuatan program akan muncul seperti gambar 3.2 dimana form tersebut masih kosong dan akan diisi sesuai kebutuhan.

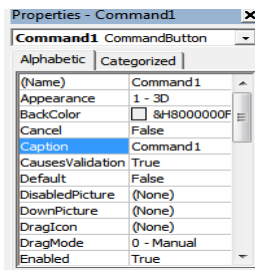


Gambar 3.2 Form pada Microsoft Visual Basic

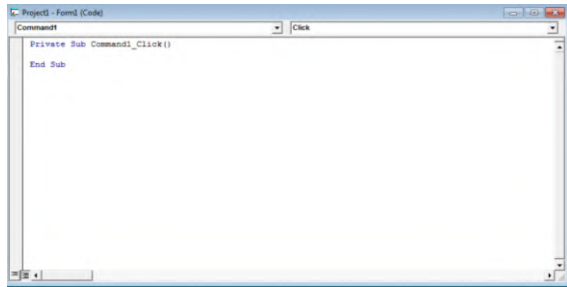
Setelah itu pembuatan *command button* yang diambil dari toolbox yang ditandai dengan panah merah pada gambar 3.2. setelah dilakukan klik satu kali pada toolbox maka *klik* lalu *drag* pada *form1* sesuai kebutuhan sehingga akan muncul kotak *command button* seperti pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Pembuatan *command button*

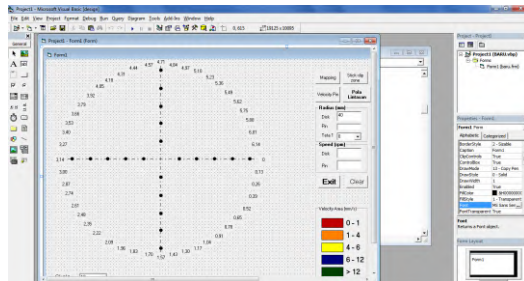


**Gambar 3.4** Propertiesbox



**Gambar 3.5** *Project 1*

Setelah *command button 1* telah jadi maka langkah selanjutnya yaitu merubah nama dengan cara merubah nama *command1* pada kotak caption yang berwarna biru pada gambar 3.4 dan dirubah namanya sesuai kebutuhan dimisalkan yaitu “Run”. Langkah selanjutnya untuk memasukan data *coding* agar dapat di *running* programnya maka klik dua kali pada *command button* yang telah dibuat. Maka akan muncul form dengan judul *project 1* seperti pada gambar 3.5. Selanjutnya yaitu memasukan *coding* sesuai pembahasan pembahasan *coding* selanjutnya. Setelah *coding* dimasukkan kedalam *project1* maka *commandbutton* tersebut sudah bisa dijalankan.



Gambar 3.6 Form 1

Gambar 3.6 merupakan form yang telah jadi untuk selanjutnya dimasukkan *coding* agar *button-button* yang telah dibuat pada nantinya bisa dijalankan. Berikut ini merupakan fungsi-fungsi tombol yang telah dibuat :

- Form radius disk yaitu form untuk mengisi dan mengubah-ubah besar radius disk sesuai kebutuhan. Radius disk yang dimaksud disini adalah letak penempatan pin pada disk. Nilai radius yang diubah-ubah hanya akan menyebabkan perubahan pola lintasan. (Radius disk yang dizinkan -70 sampai 70). Tanda + dan tanda - dalam pengisian angka akan mempengaruhi letak awal mulai diputarnya pin pada disk.
- Form radius pin yaitu form untuk mengisi dan mengubah-ubah besar radius pin sesuai kebutuhan. Radius pin yang dimaksud adalah

untuk memvisualisasikan pola lintasan titik pada radius pin yang diinginkan. Nilai pin yang diubah-ubah akan menyebabkan perubahan pola lintasan. Nilai pin tidak diperbolehkan melebihi dari besarnya disk karena ketika pin melebihi besar disk kontak pada pin dan disk akan tidak seragam. Tanda + dan tanda – dalam pengisian angka akan mempengaruhi letak awal mulai diputarnya pin pada disk.

- c. Form kecepatan disk yaitu form untuk mengisi dan mengubah-ubah kecepatan putar disk sesuai kebutuhan. Dimana kecepatan disk tidak diperbolehkan melebihi dari kecepatan pin karena ketika disk berputar lebih cepat dari pin maka yang fenomena *stick-slip* tidak akan terjadi. Perbedaan tanda + dan – pada pengisian angka kecepatan putar disk akan mempengaruhi arah putaran dari disk ( jika + arah *cw* sedangkan jika – arah menjadi *ccw*).
- d. Form kecepatan pin yaitu untuk mengisi dan mengubah-ubah kecepatan putar pin sesuai kebutuhan. Dimana kecepatan pin tidak diperbolehkan lebih kecil dari putaran disk karena fenomena *stick-slip* tidak akan terlihat. Perbedaan tanda + dan – pada pengisian angka kecepatan putar disk akan mempengaruhi arah putaran dari disk ( jika + arah *cw* sedangkan jika – arah menjadi *ccw*).

- e. Form Skala yaitu untuk membesarkan dan mengecilkan visualisasi arah vektor kecepatan dari not not yang dianalisa.
- f. Tombol Pola Lintasan merupakan fitur pada program ini untuk mengetahui jalur yang akan dilalui pada titik yang dianalisa ketika digesekkan pada disk.
- g. Tombol clear pada program ini berfungsi untuk menghapus angka-angka yang telah diisi pada form radius pin, disk dan speed pin dan disk.
- h. Tombol Exit pada program ini yaitu perintah untuk keluar dari program.
- i. Tombol *Velocity* pin pada program ini berfungsi untuk memvisualisasikan arah arah vektor kecepatan pada titik titik yang dianalisa pada pin.
- j. Tombol *Mapping* pada program ini berfungsi untuk memvisualisasikan titik titik yang mempunyai kecepatan yang seragam pada pin dimana hasil visualisasi ini merupakan hasil dari pin yang berputar 1 titik pada 1 teta<sup>2</sup>.  
Tombol *Stick-slip zone* pada program ini yaitu untuk memvisualisasikan titik titik yang mempunyai kecepatan yang seragam dimana hasil dari visualisasi tersebut merupakan hasil satu putaran pin pada setiap *node* diseluruh teta<sup>2</sup>. Hasil dari visualisasi ini akan menjadi acuan untuk pengujian langsung



### 3.1.5.2. Pemrograman pola lintasan

Pemrograman pola lintasan ditujukan untuk membentuk pola lintasan dengan *coding* seperti berikut:

```
Cls
xo = 4500
yo = 3900
R1 = Val(Text1)
R2 = Val(Text2)
W1 = Val(Text3)
W2 = Val(Text4)
For t = 0 To 10 Step 0.0001
    teta1 = W1 * t
    teta2 = W2 * t
    xp = R1 * Cos(teta1) + R2 * Cos(teta2)
    yp = R1 * Sin(teta1) + R2 * Sin(teta2)
    PSet (xo + 50 * xp, yo + 50 * yp)
Next t
End Sub
```

### 3.1.5.3. Pemrograman *coding* untuk membuat vektor kecepatan

Pemrograman vektor kecepatan dilakukan dengan *coding* seperti berikut:

```
Private Sub Command3_Click()
    Cls
    skala = 346
    skala2 = Val(Combo4)
    For teta3 = 0 To 6.28 Step 0.008
        Circle (xo + 10 * skala * Cos(teta3), yo + 10 * skala * Sin(teta3)), 7
    Next teta3

    teta1 = Val(Combo3) 'ASUMSI satu titik tertentu
    For teta2 = 0 To 6.28 Step 0.130833
```

```

For R = 0 To 10 Step 1
    Circle (xo + R * skala * Cos(teta2), yo + R * skala *
Sin(teta2)), 28
    vx = -R1 * W1 * Sin(teta1) - R * W2 * Sin(teta2)
    vy = R1 * W1 * Cos(teta1) + R * W2 * Cos(teta2)
    Line -(xo + R * skala * Cos(teta2) + skala2 * vx, yo + R
* skala * Sin(teta2) + vy * skala2)
Next R
Next teta2
End Sub

```

### 3.1.5.4. Pemrograman *Mapping*

Pemrograman *mapping* dilakukan dengan *coding* seperti berikut :

```

Private Sub Command7_Click()
Cls
skala = 346
skala2 = 10

teta1 = Val(Combo3)
'For teta2 = 0 To 6.28 Step 0.0075
teta2 = 3.14
For teta3 = 0 To 6.28 Step 0.0075
    For R = 0 To 10 Step 0.0275
        Circle (xo + R * skala * Cos(teta3), yo + R * skala *
Sin(teta3)), 20, &H4000&

        vx = -R1 * W1 * Sin(teta1) - R * W2 * Sin(teta3)
        vy = R1 * W1 * Cos(teta1) + R * W2 * Cos(teta3)
        V = Sqr(vx ^ 2 + vy ^ 2)

        If V < 1.5 Then Circle (xo + R * skala * Cos(teta3), yo
+ R * skala * Sin(teta3)), 25, &HC0&: GoTo 10
    
```

```

    If V < 4 Then Circle (xo + R * skala * Cos(teta3), yo +
R * skala * Sin(teta3)), 25, &H80FF&: GoTo 10
    If V < 6 Then Circle (xo + R * skala * Cos(teta3), yo +
R * skala * Sin(teta3)), 25, &HFFFF&: GoTo 10
    If V < 12 Then Circle (xo + R * skala * Cos(teta3), yo +
R * skala * Sin(teta3)), 25, &H800000&: GoTo 10

10 Next R
'Next teta2
Next teta3
End Sub

```

### 3.1.5.5. Input Variasi

Memasukan data untuk variasi radius pin, radius disk,  $\omega$  pin dan  $\omega$  disk. Dimana radius disk dibuat tetap yaitu 40 mm dan radius disk dibuat 10 mm. Variasi rasio antara kecepatan pin dan disk dari 1 hingga 24.

### 3.1.6. Pembuatan Grafik, Analisa *Iso-friction Zones* dan Validasi Data Hasil Simulasi dengan Pengujian Langsung

*Iso-friction* adalah daerah yang memiliki besar gesekan yang seragam dalam satu benda yang terkena *multi-directional friction*. Data yang diperoleh selanjutnya diolah dan diplot ke dalam grafik yang disesuaikan dengan perhitungan yang dilakukan pada program excel. Kemudian hasil dianalisa dan dilakukan pembahasan terhadap grafik yang diperoleh. Penggambar adanya daerah yang mengalami *stick-slip* terbesar yang digambarkan dengan diberi warna yang berbeda dengan warna pin dan daerah tersebut adalah daerah yang mengalami *iso-friction*.

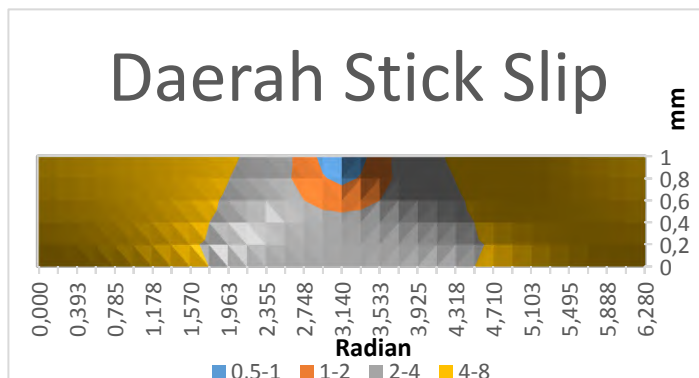
### 3.1.7. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap terakhir ini, keseluruhan hasil penelitian disimpulkan kemudian diberikan pula saran untuk penelitian kedepannya. Kesimpulan yang akan diamati, yaitu sebagai berikut:

- Mengetahui besaran rasio kecepatan antara pin dan disk pada benda yang terkena kontak *multi-directional*.
- Mengamati dan menganalisa daerah *stick-slip* akibat *multi-directional contact* dengan kondisi *dry sliding*.
- Mengamati dan menganalisa perbedaan hasil penelitian *stick-slip* akibat *multi-directional contact* antara teoritis dan eksperimen.

### 3.2. Perencanaan Simulasi

Penelitian yang dilakukan ini akan dilakukan dengan batasan pengujian gesekan banyak arah (*multi-directional contact friction*). Perencanaan simulasi diawali dengan analisa numerik lintasan yang bergesekan antara pin dengan disk.



**Gambar 3.7.** Grafik Perhitungan Gesekan Antara Pin dan Disk

Gambar 3.2 merupakan grafik hasil dari perhitungan yang telah dilakukan dengan memasukan persamaan 2. Pada gambar tersebut dapat terlihat fenomena nilai vektor kecepatan yang bernilai hampir nol terjadi pada radian 2,994 hingga 3,336 pada radius 0,8 hingga 1 mm.

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

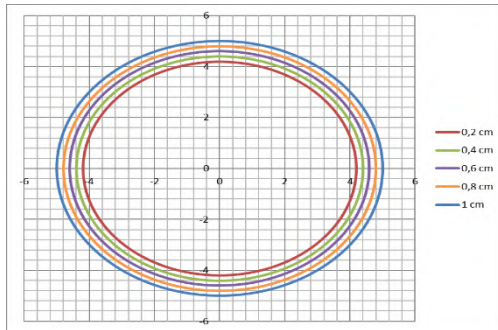
Bab ini akan membahas dan menganalisa hasil simulasi pemrograman tentang daerah yang mengalami *stick-slip* antara pin dan disk. Pembahasan yang dilakukan yaitu meliputi, analisa daerah yang mengalami *stick-slip* akibat *Multi-Directional Contact Friction* dimana pemrograman menggunakan software Microsoft Visual Basic 6.0.

#### **4.1. Analisa Perbandingan Rasio Kecepatan Pin dan Disk Akibat *Multi-Directional Contact Friction***

Gesekan pada pin dan disk yang terjadi pada *multi-directional contact friction* akan menyebabkan timbulnya daerah-daerah yang mengalami *stick-slip* dan tidak timbulnya daerah *stick-slip*. Pada penelitian ini dilakukan variasi rasio kecepatan pin dan disk untuk mendapatkan daerah yang mengalami *stick-slip* dan yang tidak mengalami *stick-slip*.

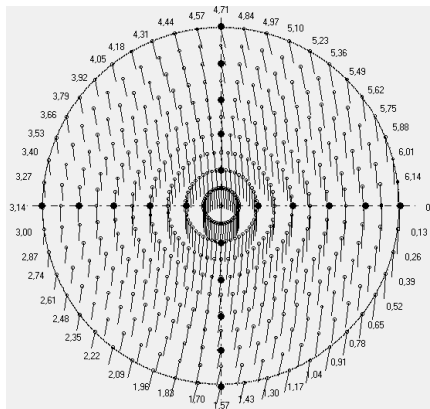
##### **4.1.1 Rasio Kecepatan pin dan disk yang tidak mengalami *stick-slip***

Gesekan yang terjadi antara pin dan disk yang tidak mengalami *stick-slip* terjadi pada rasio kecepatan kurang dari 3 dan pada rasio kecepatan lebih dari 24. Tidak terjadinya *stick-slip* pada rasio kecepatan tersebut dikarenakan tidak adanya kecepatan yang mendekati nilai 0 (nol) atau berhenti sesaat. Visualisasi variasi rasio yang tidak mengalami *stick-slip* dapat dilihat pada gambar gambar hasil simulasi pemrograman dengan bantuan microsoft visual basic dibawah ini :

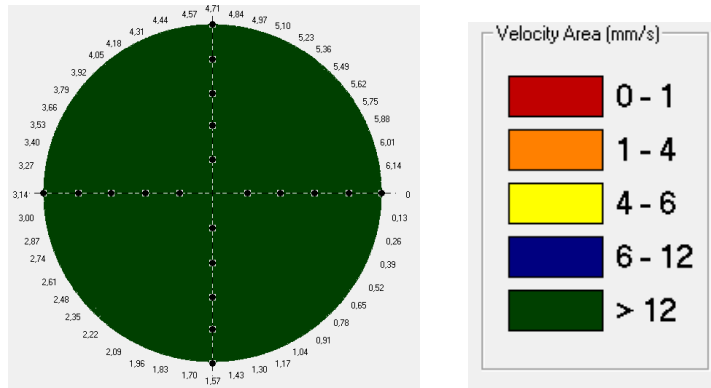


**Gambar 4.1** Pola Lintasan pada Rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1

Pada Gambar 4.1 pola lintasan yang terjadi hanya membentuk lingkaran saja baik pada radius 0,2 cm sampai 1 cm. Hal ini terjadi karena pin yang berputar pada disk tidak mengalami berhenti sesaat sesuai perhitungan dari persamaan 2.1 dan pada grafik dan dilihat dengan pengamatan tidak terjadinya pola berhenti sesaat dan pin bergerak secara terus menerus.



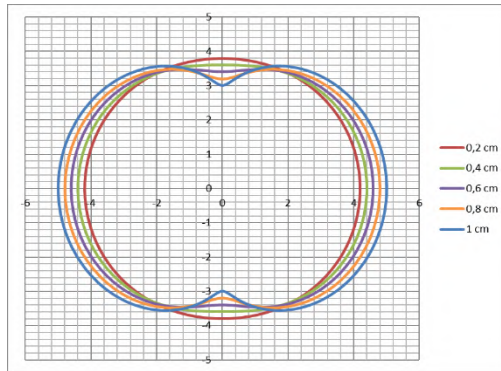
**Gambar 4.2** Vektor Kecepatan pada Rasio Kecepatan Pin dan Disk Sebesar 1



**Gambar 4.3** Mapping pada Rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1

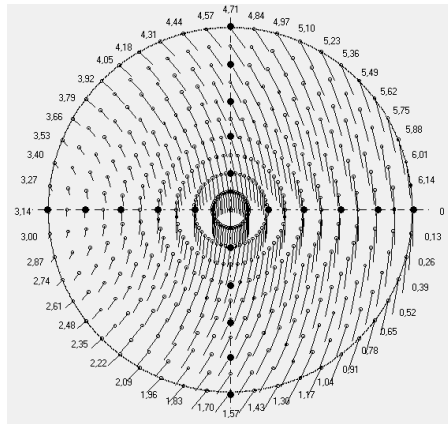
Pada gambar 4.2 merupakan hasil simulasi vektor kecepatan hasil dari perumusan pada persamaan 2.2. Dapat terlihat pada gambar 4.2 dimana semua titik titik mempunyai garis kearah bawah yang berarti pada titik-titik tersebut tidak ada yang mempunyai nilai 0. Pada gambar 4.3 merupakan mapping pin sesuai perhitungan vektor kecepatan pada gambar 4.2 dan pada gambar 4.3 pada permodelan pin semua daerah berwarna hijau dan tidak munculnya warna lain yang mempunyai arti bahwa pada mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1 tidak ada fenomena *stick-slip*. Hal ini dikarenakan pada kecepatan rendah pin yang berputar pada disk mengalami pergerakan secara terus menerus dan tidak mengalami gesekan yang berlebih yang menyebabkan pin mengalami diam sesaat.



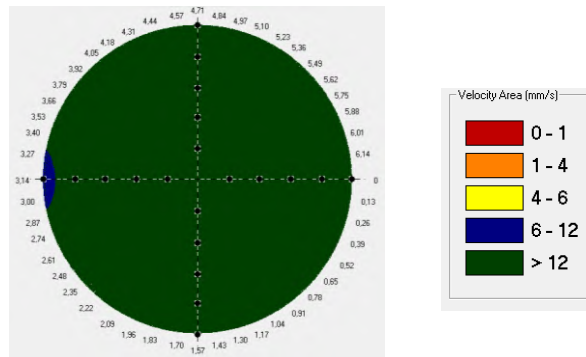


**Gambar 4.4** Pola lintasan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 3

Pada Gambar 4.4 pola lintasan yang terjadi hanya membentuk lingkaran saja baik pada radius 0,2 cm sedangkan pada radius 0,4 cm sampai 1 cm sudah membentuk pola tersendiri. Tetapi sesuai pengamatan mata tidak terlihat pola lintasan yang diindikasikan terjadinya berhenti sejenak. Hal ini terjadi karena pin yang berputar pada disk tidak mengalami berhenti sesaat sesuai perhitungan dari persamaan 2.1 dan pada grafik dan dilihat dengan pengamatan tidak terjadinya pola berhenti sesaat dan pin bergerak secara terus menerus.

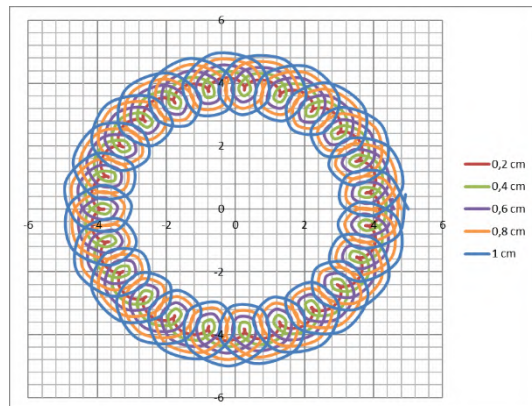


**Gambar 4.5** Vektor Kecepatan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 3



**Gambar 4.6** Mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 3

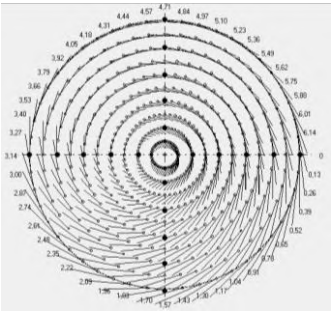
Pada gambar 4.5 merupakan hasil simulasi vektor kecepatan hasil dari perumusan pada persamaan 2.2. Dapat terlihat pada gambar 4.5 dimana semua titik titik mempunyai garis kearah bawah yang berarti pada titik-titik tersebut tidak ada yang mempunyai nilai 0. Pada gambar 4.6 merupakan mapping pin sesuai perhitungan vektor kecepatan pada gambar 4.5 dan pada gambar 4.6 pada permodelan pin semua daerah berwarna hijau dan meskipun munculnya warna biru tetapi tidak munculnya warna merah yang mempunyai arti bahwa pada mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1 tidak ada fenomena *stick-slip*. Hal ini dikarenakan pada kecepatan rendah pin yang berputar pada disk mengalami pergerakan secara terus menerus dan tidak mengalami gesekan yang berlebih yang menyebabkan pin mengalami diam sesaat.



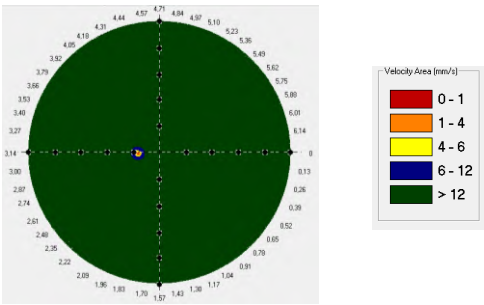
**Gambar 4.7** Pola lintasan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 24

Pada Gambar 4.7 pola lintasan yang terjadi berbentuk melingkar terus-menerus baik pada radius 0,2 cm sampai 1 cm. Hal ini terjadi karena pin yang berputar pada disk tidak mengalami berhenti sesaat sesuai perhitungan dari persamaan 2.1 dan pada grafik dan dilihat

dengan pengamatan tidak terjadinya pola berhenti sesaat dan pin bergerak secara terus menerus.



**Gambar 4.8** Vektor Kecepatan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 24



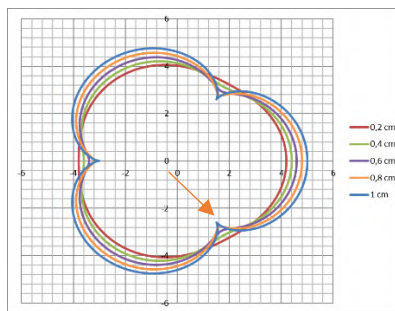
**Gambar 4.9** Mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 24

Pada gambar 4.8 merupakan hasil simulasi vektor kecepatan hasil dari perumusan pada persamaan 2.2. Dapat terlihat pada gambar 4.9 dimana semua titik titik mempunyai garis ke segala arah yang berarti pada titik-titik tersebut tidak ada yang mempunyai nilai 0. Pada gambar 4.8 merupakan mapping pin sesuai perhitungan vektor kecepatan pada gambar 4.8 dan pada gambar 4.9 di

petakan dengan munculnya warna lain tetapi sesuai dengan perhitungan vektor kecepatan tidak munculnya nilai kecepatan yang bernilai 0 sehingga pada rasio ini tidak terjadinya fenomena *stick-slip* pada pin. Hal ini disebabkan pada kecepatan tinggi pin yang diputar pada disk tidak sempat berhenti sejenak.

### 1.1.2. Rasio Kecepatan Pin dan Disk yang Mengalami Fenomena *Stick-slip*

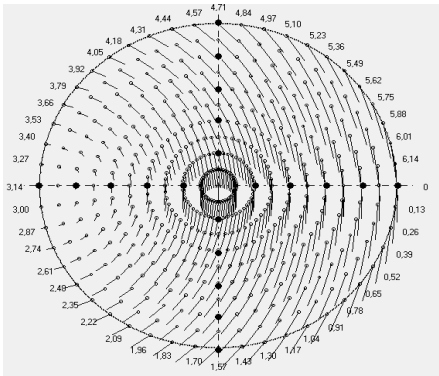
Gesekan yang terjadi antara pin dan disk yang tidak mengalami *stick-slip* terjadi pada rasio kecepatan kurang dari 3 dan pada rasio kecepatan lebih dari 24. Tidak terjadinya *stick-slip* pada rasio kecepatan tersebut dikarenakan tidak adanya kecepatan yang mendekati nilai 0 (nol) atau berhenti sesaat. Visualisasi variasi rasio yang mengalami *stick-slip* dapat dilihat pada gambar hasil simulasi pemrograman dengan bantuan microsoft visual basic dibawah ini :



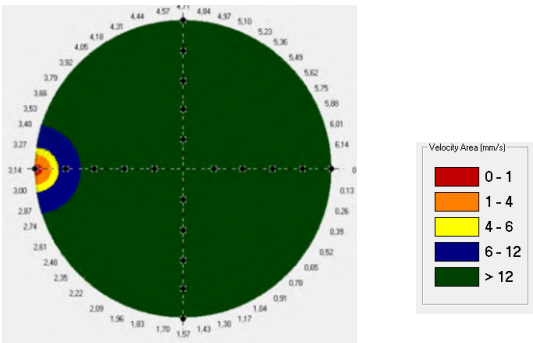
**Gambar 4.10** Pola lintasan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 4

Pada Gambar 4.10 pola lintasan pada radius 0,2 cm sampai 1 cm membentuk pola tersendiri. Pada pola lintasan 1 cm dapat terlihat ada pola dimana pin berhenti sejenak

yang ditunjukkan pada panah merah pada grafik. Hal ini berarti dapat diindikasikan pada radius kecepatan pin dan disk 4 sudah timbul fenomena *stick-slip*. Setelah diindikasikan dengan pola lintasan yang terjadi maka selanjutnya dilakukan perhitungan vektor kecepatan dengan simulasi pemrograman.



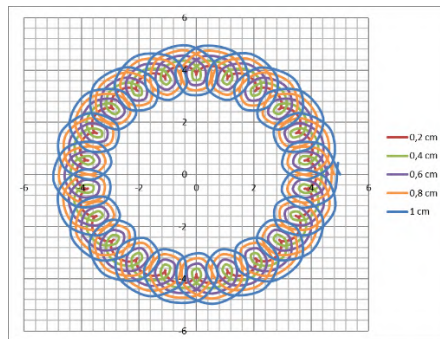
**Gambar 4.11** Vektor kecepatan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 4



**Gambar 4.12** Mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 24

Pada gambar 4.11 merupakan hasil simulasi vektor kecepatan hasil dari perumusan pada persamaan 2. Dapat

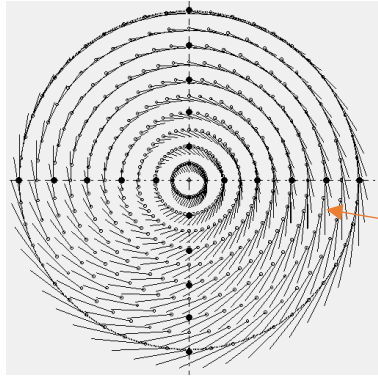
terlihat pada gambar 4.11 dimana semua titik titik mempunyai arah-arrah garis tersendiri yang berarti pada titik-titik tersebut tidak ada yang mempunyai nilai 0 kecuali pada yang ditandai dengan panah merah. Pada titik yang ditandai panah tersebut memiliki nilai yang hampir mendekati 0. Pada gambar 4.12 merupakan mapping pin sesuai perhitungan vektor kecepatan pada gambar 4.11 dan pada gambar 4.12 di petakan dengan munculnya warna lain sesuai keterangan gambar diatas. Karena pada perhitungan vektor kecepatan ditandai adanya titik yang mempunyai nilai hampir 0 maka pada mapping ditandai dengan munculnya warna merah. sehingga pada rasio ini terjadi fenomena *stick-slip* pada pin. Hal ini disebabkan pada rasio ini pin yang diputar pada disk sempat berhenti sejenak.



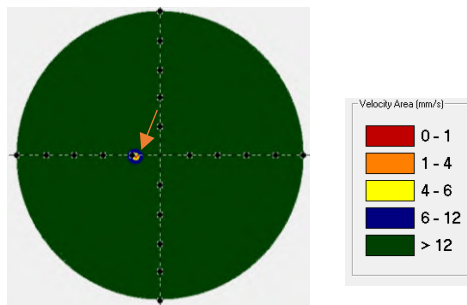
**Gambar 4.13** Pola Lintasan Rasio Kecepatan pin dan disk sebesar 23

Pada Gambar 4.13 pola lintasan pada radius 0,4 cm sampai 1 cm membentuk pola tersendiri. Pada pola lintasan 0,2 cm dapat terlihat ada pola dimana pin berhenti sejenak yang ditunjukkan pada panah merah pada grafik. Hal ini berarti dapat diindikasikan pada radius kecepatan pin dan disk 23 timbul fenomena *stick-slip*.

Setelah diindikasikan dengan pola lintasan yang terjadi maka selanjutnya dilakukan perhitungan vektor kecepatan dengan simulasi pemrograman



**Gambar 4.14** Vektor Kecepatan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 23

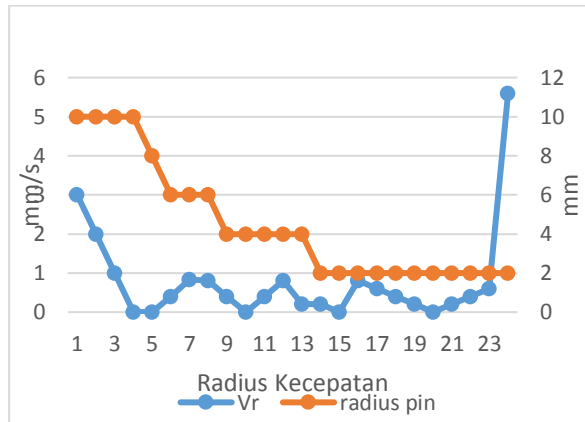


**Gambar 4.15** Mapping rasio kecepatan pin dan disk sebesar 23

Pada gambar 4.14 merupakan hasil simulasi vektor kecepatan hasil dari perumusan pada persamaan 2. Dapat terlihat pada gambar 4.14 dimana semua titik titik mempunyai arah-arrah garis tersendiri yang berarti pada titik-titik tersebut tidak ada yang mempunyai nilai 0



keculai pada yang ditandai dengan panah merah. Pada titik yang ditandai panah tersebut memiliki nilai yang hampir mendekati 0. Pada gambar 4.15 merupakan mapping pin sesuai perhitungan vektor kecepatan pada gambar 4.14 dan pada gambar 4.15 di petakan dengan munculnya warna lain sesuai keterangan gambar diatas. Karena pada perhitungan vektor kecepatan ditandai adanya titik yang mempunyai nilai hampir 0 maka pada mapping ditandai dengan munculnya warna merah. sehingga pada rasio ini terjadi fenomena *stick-slip* pada pin. Hal ini disebabkan pada rasio ini pin yang diputar pada disk sempat berhenti sejenak.



**Gambar 4.16** Grafik Perbandingan Kecepatan Vektor vs Radius pin berdasarkan rasio kecepatan.

Gambar 4.16 merupakan grafik perbandingan kecepatan vektor dan radius pin berdasarkan masing masing rasio kecepatan pin dan disk. Dapat dilihat pada grafik trendline biru merupakan garis yang menunjukkan kecepatan vektor berdasarkan rasio pin dengan disk sebesar 1 hingga 24 dan trendline merah merupakan garis

radius pin tempat terjadinya fenomena *stick-slip* berdasarkan rasio pin dengan disk sebesar 1 hingga 24.

Pada gambar 4.16 dapat dilihat pada rasio 1 mempunyai kecepatan vektor sebesar 3,000001691 mm/s yang terjadi pada radius pin 10 mm, pada rasio 2 mempunyai kecepatan vektor sebesar 2,000002537 mm/s yang terjadi pada radius pin 10 mm, pada rasio 3 mempunyai kecepatan vektor sebesar 1,000003805 mm/s yang terjadi pada radius pin 10 mm, pada rasio 4 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,006370614 mm/s yang terjadi pada radius pin 10 mm, pada rasio 5 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,006370614 mm/s yang terjadi pada radius pin 8 mm, pada rasio 6 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,400045655 mm/s yang terjadi pada radius pin 6 mm, pada rasio 7 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,833393 mm/s yang terjadi pada radius pin 6 mm, pada rasio 8 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,800030438 mm/s yang terjadi pada radius pin 6 mm, pada rasio 9 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,400045655 mm/s yang terjadi pada radius pin 4 mm, pada rasio 10 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,006370614 mm/s yang terjadi pada radius pin 4 mm, pada rasio 11 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,4000558 mm/s yang terjadi pada radius pin 4 mm, pada rasio 12 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,800030438 mm/s yang terjadi pada radius pin 4 mm, pada rasio 13 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,200021983 mm/s yang terjadi pada radius pin 4 mm, pada rasio 14 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,200021983 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 15 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,000015219 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 16 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,800020292 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 17 mempunyai kecepatan vektor sebesar

0,600028747 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 18 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,400045655 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 19 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,200096365 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 20 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,006370614 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 21 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,200106507 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 22 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,4000558 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 23 mempunyai kecepatan vektor sebesar 0,600038892 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm, pada rasio 24 mempunyai kecepatan vektor sebesar 5,600008697 mm/s yang terjadi pada radius pin 2 mm

Pada gambar 4.16 trendline merah mempunyai pola menurun yang menyatakan bahwa semakin besarnya rasio kecepatan pin dan disk maka radius pin terjadinya fenomena *stick-slip* juga semakin mengecil. Dan dapat dilihat pada trendline berwarna biru mempunyai pola menurun pada rasio 1 hingga rasio 3 dimana pada rasio tersebut kecepatan vektor yang dihasilkan masih bernilai besar sehingga pada daerah tersebut tidak terjadi fenomena *stick-slip*. Pada rasio 4 sampai rasio 23 trend dengan berwarna biru membentuk trend naik turun tetapi nilai besaran vektor kecepatan pada rasio tersebut masih berada dinilai besaran terjadinya fenomena *stick-slip*. Dan pada rasio 24 trend dengan berwarna biru naik yang ditandai dengan naiknya nilai vektor kecepatan yang berarti pada rasio tersebut sudah tidak terjadi lagi fenomena *stick-slip*.

## 4.2 Multi-directional Friction Pada Pin

Gesekan yang terjadi antara pin dan disk akan menimbulkan fenomena gesekan banyak arah. Jika di tinjau pada satu titik pada pin yang diputar dan di gesek dengan disk, pada titik tersebut akan mengalami perubahan perubahan vektor kecepatan yang berbeda beda. Berdasarkan analisa numerik yang telah dihitung maka didapat hasil seperti ini :

**Tabel 4.1** Tabel perhitungan vektor kecepatan arah x 0-3,14 radian

R2	Teta 2 (°)														
	0,000	0,196	0,393	0,589	0,785	0,981	1,178	1,374	1,570	1,766	1,963	2,159	2,355	2,551	2,748
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0	-0,11599	-0,306	-0,44426	-0,56546	-0,66495	-0,73893	-0,78452	-0,8	-0,78477	-0,73941	-0,66566	-0,56636	-0,44532	-0,30718
0,4	0	-0,31199	-0,612	-0,88852	-1,13092	-1,32991	-1,47784	-1,56904	-1,6	-1,56954	-1,47882	-1,33132	-1,13272	-0,89063	-0,61435
0,6	0	-0,46798	-0,918	-1,33277	-1,69638	-1,99486	-2,21676	-2,35356	-2,4	-2,3543	-2,21822	-1,99699	-1,69908	-1,33595	-0,92153
0,8	0	-0,62398	-1,224	-1,77703	-2,26184	-2,65982	-2,95568	-3,13808	-3,2	-3,13907	-2,95763	-2,66285	-2,26544	-1,78127	-1,22871
1	0	-0,77997	-1,53	-2,22129	-2,8273	-3,32477	-3,6946	-3,9226	-4	-3,92384	-3,69704	-3,32831	-2,8318	-2,22658	-1,53588

**Tabel 4.2** Tabel perhitungan vektor kecepatan arah x 3,336-6,28 radian

R2	3,336	3,533	3,729	3,925	4,121	4,318	4,514	4,710	4,906	5,103	5,299	5,495	5,691	5,888	6,084	6,280
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,154744	0,304822	0,443197	0,564558	0,664245	0,738431	0,784269	0,799998	0,785014	0,739893	0,666368	0,56726	0,446374	0,308353	0,158493	0,002548
0,4	0,3039489	0,609644	0,886395	1,129116	1,32849	1,476863	1,568538	1,599995	1,570028	1,479787	1,332736	1,13452	0,892749	0,616705	0,316985	0,005059
0,6	0,464233	0,914466	1,329592	1,696374	1,992735	2,215294	2,352807	2,399993	2,355043	2,21968	1,999103	1,70178	1,339123	0,925058	0,475478	0,007645
0,8	0,618977	1,219288	1,772789	2,258233	2,656981	2,953726	3,137075	3,199991	3,140057	2,959574	2,665471	2,269039	1,785498	1,23341	0,633971	0,010193
1	0,773721	1,52411	2,215987	2,822791	3,321226	3,692157	3,921344	3,999989	3,925071	3,699467	3,331839	2,836299	2,231872	1,541763	0,792463	0,012741

**Tabel 4.3** Tabel perhitungan vektor kecepatan arah y 0 – 3,14 radian

R2	Teta 2 (°)														
	0,000	0,196	0,393	0,589	0,785	0,981	1,178	1,374	1,570	1,766	1,963	2,159	2,355	2,551	2,748
0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0,2	4,8	4,784644	4,739165	4,665308	4,565911	4,444787	4,306588	4,156619	4,000637	3,844631	3,694589	3,556272	3,434991	3,3354	3,261324
0,4	5,6	5,569288	5,478329	5,330617	5,131821	4,889574	4,613176	4,313238	4,001274	3,689261	3,389178	3,112545	2,869981	2,6708	2,522647
0,6	6,4	6,353931	6,217494	5,995925	5,69732	5,334362	4,919764	4,469857	4,001911	3,533892	3,083767	2,668817	2,304972	2,0062	1,783971
0,8	7,2	7,138575	6,956658	6,661234	6,263642	5,779149	5,226352	4,626476	4,002548	3,378523	2,778356	2,22509	1,739963	1,3416	1,045295
1	8	7,923219	7,695823	7,326542	6,829553	6,223936	5,532941	4,783095	4,003185	3,223154	2,472946	1,781362	1,174953	0,677	0,306619

**Tabel 4.4** Tabel perhitungan vektor kecepatan arah y 3,14-6,28 radian

R2	3,140	3,336	3,533	3,729	3,925	4,121	4,318	4,514	4,710	4,906	5,103	5,299	5,495	5,691	5,888	6,084	6,280
0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0,2	3,200001	3,215109	3,260349	3,333985	3,433119	3,554154	3,692235	3,842132	3,998089	4,154119	4,304233	4,442667	4,564107	4,663889	4,738186	4,784143	4,799996
0,4	2,400002	2,430218	2,520698	2,66797	2,866379	3,108309	3,384471	3,684264	3,996178	4,308238	4,608466	4,885334	5,128213	5,32778	5,476372	5,568286	5,599992
0,6	1,600003	1,645326	1,781047	2,001955	2,299569	2,662463	3,076706	3,526395	3,994266	4,462358	4,912699	5,328001	5,69232	5,99167	6,214558	6,352429	6,399888
0,8	0,800004	0,860435	1,041396	1,33594	1,732758	2,216617	2,768942	3,368527	3,992355	4,616477	5,216932	5,770667	6,256426	6,65556	6,952744	7,136572	7,199984
1	5,07E-06	0,075544	0,301745	0,669925	1,165948	1,770772	2,461177	3,210659	3,990444	4,770596	5,521164	6,213334	6,820533	7,31945	7,690931	7,920714	7,999998

**Tabel 4.5** Tabel perhitungan vektor kecepatan resultan 0-3,14 radian

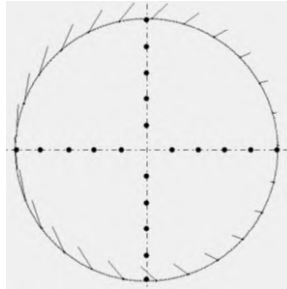
Resultan Kecepatan																	
R	0,000	0,156	0,393	0,589	0,785	0,981	1,178	1,374	1,570	1,766	1,963	2,159	2,355	2,551	2,748	2,944	3,140
0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0,2	4,8	4,787186	4,749333	4,684113	4,600792	4,494252	4,36952	4,230006	4,07984	3,923907	3,767853	3,618035	3,481368	3,364996	3,275758	3,219448	3,200001
0,4	5,6	5,578019	5,512407	5,454957	5,354957	5,067208	4,844111	4,589761	4,309115	4,009251	3,69776	3,385315	3,085426	2,815386	2,596378	2,451467	2,400003
0,6	6,4	6,371142	6,284899	6,142264	5,944902	5,695164	5,39612	5,051619	4,6664	4,246309	3,798702	3,33247	2,863525	2,410311	2,007927	1,713049	1,600008
0,8	7,2	7,165794	7,063517	6,894191	6,659515	6,361854	6,004213	5,590331	5,124489	4,611744	4,057937	3,469974	2,856519	2,229978	1,613183	1,067418	0,800002
1	8	7,961517	7,846438	7,655869	7,391646	7,056308	6,653084	6,185851	5,659106	5,077916	4,447872	3,775036	3,065881	2,32723	1,566189	0,790081	0,006371

**Tabel 4.6** Tabel perhitungan vektor kecepatan resultan 3,14-6,28 radian

R	3,140	3,336	3,533	3,729	3,925	4,121	4,318	4,514	4,710	4,906	5,103	5,299	5,495	5,691	5,888	6,084	6,280
0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0,2	3,200001	3,218831	3,274567	3,363314	3,479298	3,615693	3,765353	3,921359	4,077341	4,227642	4,367363	4,492364	4,599223	4,685202	4,748209	4,786767	4,799997
0,4	2,400003	2,449845	2,593373	2,811362	3,080752	3,380306	3,692664	4,004261	4,304581	4,585402	4,84022	5,063859	5,25221	5,402059	5,510987	5,577301	5,599994
0,6	1,600008	1,709565	2,002093	2,403256	2,855967	3,325613	3,79126	4,239241	4,659842	5,045677	5,39088	5,690695	5,941259	6,139492	6,28033	6,370199	6,399992
0,8	0,800002	1,059944	1,603486	2,219801	2,846413	3,460193	4,048646	4,603066	5,116526	5,583172	5,997954	6,356519	6,655179	6,898098	7,0613	7,1464675	7,199991
1	0,006371	0,777401	1,553693	2,315037	3,054109	3,763798	4,437276	5,068064	5,650093	6,177764	6,646	7,050296	7,386763	7,652163	7,843943	7,960259	7,999999

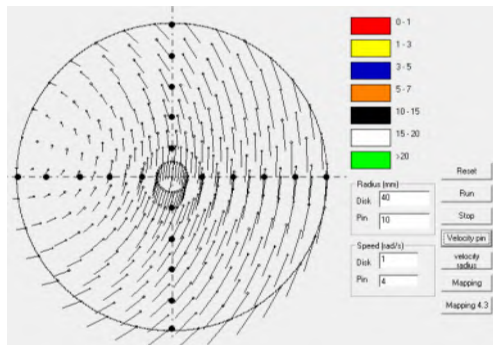
Berdasarkan data hasil perhitungan numerik pada tabel 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 dan 4.6 dapat dilihat bahwa angka – angka tersebut merupakan besaran dari hasil vektor kecepatan pada gesekan antara pin dengan disk dengan rasio kecepatan 4. Tetapi dengan terbatasnya pemetaan angka – angka pada tabel – tabel diatas pada microsoft excel maka dilakukannya pemetaan vektor kecepatan dengan bantuan pemrograman pada microsoft

visual basic. Hasil dari pemrograman pada microsoft visual basic dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10



**Gambar 4.17** Fenomena *Multi-directional Friction* pada 1 lintasan

Pada gambar 4.17 dapat dilihat bahwa ada berbagai arah vektor kecepatan yang dihasilkan ketika pin diputar berlawanan arah pada disk. Pada gambar diatas titik titik yang dihasilkan tidak terjadi dalam satu waktu yang bersamaan tetapi ketika pin sedang berputar rotasional. hal ini lah yang menandakan bahwa pada satu titik tertentu akan mempunyai arah vektor kecepatan yang banyak arah atau *multi-directional friction*.

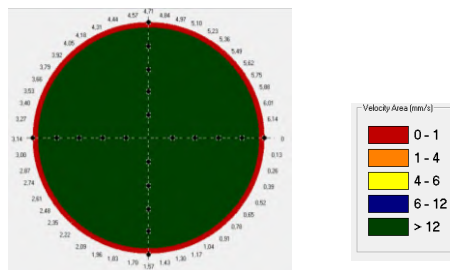


**Gambar 4.18** Vektor Kecepatan *Multidirectional Friction*

Gambar 4.18 menggambarkan dengan menggunakan banyak titik yang dilihat dan menunjukkan bahwa setiap titik titik tersebut mempunyai arah vektor kecepatan yang berbeda beda dan berubah-ubah pada rasio putaran antara pin dan disk yang sama.

#### 4.3. Fenomena *Stick-slip* Sepanjang Lintasan Pin

Pada bahasan ini penulis akan menganalisa hasil pemrograman dimana pada pin yang digesekkan dengan diputarnya pin dengan disk pada rasio tertentu akan menghasilkan fenomena *stick-slip* sepanjang lintasan pada pin.



**Gambar 4.19** Fenomena *stick-slip* sepanjang lintasan pada rasio kecepatan pin dan disk sebesar 4

Gambar 4.19 menggambarkan contoh hasil simulasi gesekan antara pin dan disk pada rasio 4 dimana zona yang berwarna merah tersebut merupakan daerah yang mempunyai kecepatan nol yang berarti mengalami efek *stick-slip*. Gambar diatas merupakan salah satu contoh pada satu rasio yang mengalami efek *stick-slip* disepanjang lintasan dimana hal ini akan terjadi juga pada rasio rasio kecepatan yang mengalami fenomenas *stick-slip* yang dibahas pada 4.1.

#### 4.4. Contoh Perhitungan

Pada sub-bab ini akan dijelaskan salah satu contoh perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan pada setiap titik yang dianalisa :

$$R1 : 40 \text{ mm}$$

$$R2 : 100 \text{ mm}$$

$$W1 : 1$$

$$W2 : 3$$

$$i : 3$$

$$\Theta 1 : 0$$

$$\Theta 2 : 0,196$$

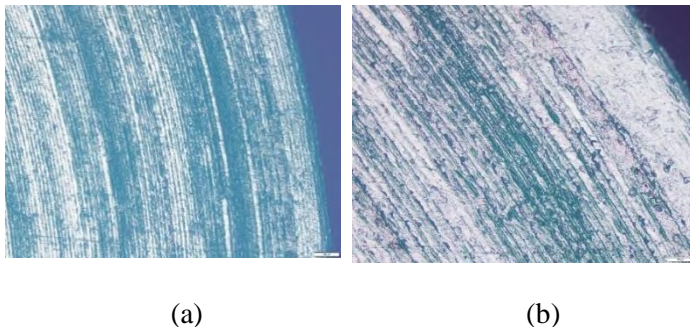
- $$\begin{aligned} vx &= -R1 \cdot \sin \theta 1 \cdot \omega 1 - R2 \cdot \omega 2 \cdot \sin \theta 2 \\ vx &= -40 \text{ mm} \cdot \sin 0 \cdot 1 - 100 \text{ mm} \cdot 3 \cdot \sin 0,196 \\ vx &= -1,02625 \text{ mm/s} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} vy &= R1 \cdot \omega 1 \cdot \cos \theta 1 + R2 \cdot \omega 2 \cdot \cos \theta 2 \\ vy &= 40 \text{ mm} \cdot 1 \cdot \cos 0 + 100 \text{ mm} \cdot 3 \cdot \cos 0,196 \\ vy &= 19,998938 \text{ mm/s} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} v &= \sqrt{vx^2 + vy^2} \\ v &= \sqrt{-1,02625^2 + 19,99893^2} \\ v &= 19,97258151 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas maka didapat kecepatan di titik pada radius 100 mm dari pusat pin dengan teta 1 bernilai 0 dan teta 2 bernilai 0,196 sebesar 19,97258151 mm/s.



### 1.5. Validasi hasil simulasi dengan pengujian langsung (Eksperimen)

Hasil yang telah dilakukan dengan metode teoritis akan divalidasi untuk menyatakan bahwa program yang telah dibuat hasilnya benar dan sama ketika diuji langsung dengan hasil pengujian langsung. Sedangkan pengujian langsung nya sudah dilakukan oleh kurnia. [13]. Kurnia [13] melakukan pengujian eksperimen antara pin dan disk dengan radius pin 10 mm dan radius disk 40 mm dengan kecepatan pin sebesar 48,3 rpm dan kecepatan disk sebesar 202,899 rpm dan mempunyai hasil seperti berikut :

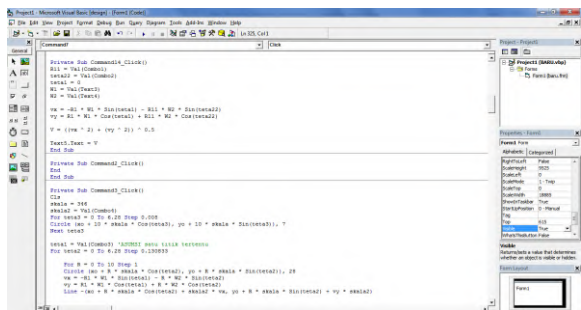
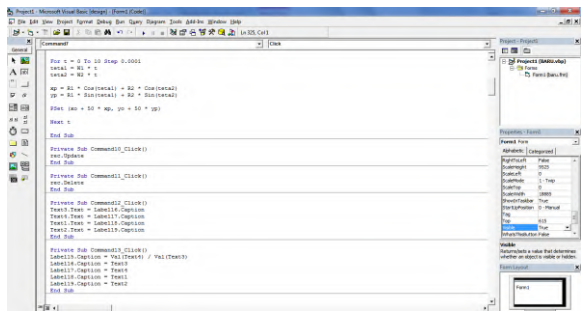
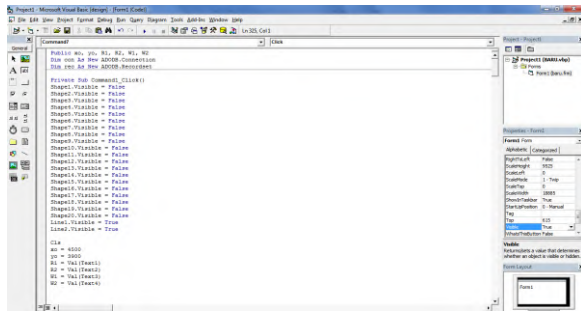


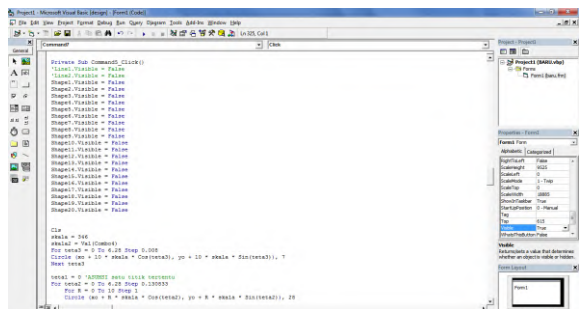
**Gambar 4.20** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 4, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 20x. Kurnia [13]

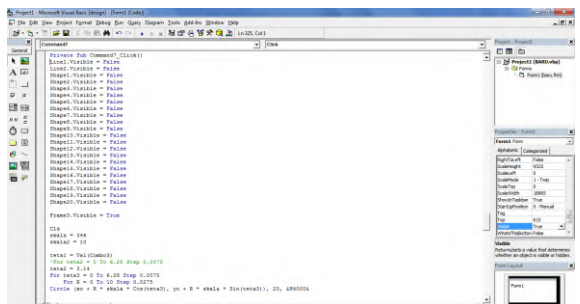
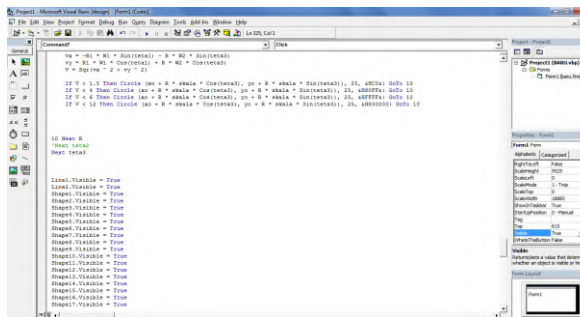
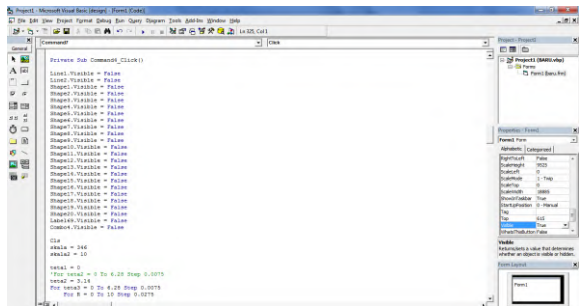
Pada Gambar 4.20 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.19 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 4, dimana kecepatan putaran disk adalah 48,3 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 202,899 rpm . dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit,. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.1.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 20x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki

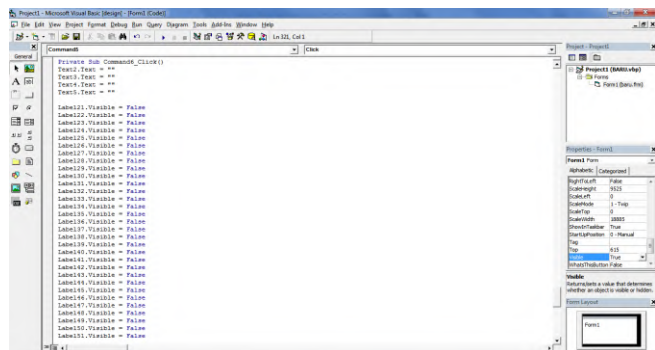
ukuran yang cukup panjang dan lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak bintik-bintik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesi. Fenomena ini terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 4,2 diperkirakan efek *stick-slip friction* terjadi pada radius 9 mm dari pusat pin. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.1, mekanisme keausan terjadi pada radius terluar dari pin. Jadi hasil yang dilakukan dengan simulasi dan hasil yang dilakukan dengan eksperimen dinyatakan sama karena fenomena *stick-slip* pada rasio 4 hasilnya sama-sama menunjukkan terjadi pada titik terluar pin.

# Lampiran









## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berikut ini merupakan kesimpulan dari tugas akhir ini adalah :

1. Program pada Microsoft Visual Basic dapat memvisualisasikan pola lintasan yang terjadi pada pin yang digesekkan dengan disk.
2. Program pada Microsoft Visual Basic dapat memvisualisasikan vektor-vektor kecepatan pada pin yang digesekkan dengan disk.
3. Program pada Microsoft Visual Basic dapat memvisualisasikan *mapping* daerah yang mengalami *stick-slip* pada pin.
4. Rasio kecepatan putaran pin dan disk sebesar 4 sampai 23 tersebut daerah yang mengalami kondisi *stick-slip*. Hal ini disebabkan oleh pada rasio 4 sampai 23 putaran pin sempat berhenti sejenak dan pada perhitungan vektor kecepatan persamaan 2.2 ditandai adanya titik yang mempunyai nilai hampir 0.
5. Fenomena *stick-slip* tidak terjadi pada rasio putaran pin dan disk sebesar 1 sampai 3 dan terjadi lagi pada putaran pin dan disk diatas 24. Pada putaran rasio rendah pin yang bergesekan dengan disk akan bergesekan secara terus-menerus dan tidak timbulnya fenomena berhenti sesaat. Sedangkan pada rasio tinggi pin yang bergesekan dengan disk tidak sempat berhenti karena akan langsung berakselerasi untuk melakukan putaran tinggi.
6. Fenomena *stick-slip* pada pin dan disk yang bergerak akan terjadi sepanjang lintasan.

7. Simulasi fenomena *stick-slip* mempunyai hasil yang sama dengan eksperimen fenomena *stick-slip* akibat *multi-directional contact friction*.

## **5.2. Saran**

Berikut ini adalah saran agar tugas akhir yang selanjutnya bisa lebih baik :

1. Diharapkan pemrograman pada software agar mendekati dengan kondisi nyata pada alat tribometer yang sudah ada.
2. Perlunya simulasi dengan software lain agar mendapatkan hasil yang lebih maksimal.



## DAFTAR PUSTAKA

- Archard, J.F. 1995. **Wear Control Handbook**. New York : ASME Centennial Research Project.
- Bhushan, Bharat. 2013. **Introduction to Tribology**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Bhushan, Bharat. 2001. **Modern Tribology Handbook Volume I**. USA : CRC Press.
- Bhushan, Bharat. 2013. **Principles and Applications of Tribology**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Czichos, Horst. 1978. **Tribology : A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**. Amsterdam : Elsevier Scientific.
- Hasry, Muhammad. 2013. **Studi Eksperimental Keausan Permukaan Material Akibat Adanya *Multi-Directional Contact Friction***. Surabaya.
- Khonsari, M. Michael. 2001. **Applied Tribology : Bearing Design and Lubrication**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Kusumaningrum, Dewi Fasholi. 2015. **Studi Eksperimental dan Analisa Keausan Permukaan yang Dipengaruhi Oleh *Stick-Slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contact Friction***. Surabaya.
- Lee, Dong Woog. 2012. **Stick-slip Friction and Wear of Articular Joints**. California.
- Ludema, C. Kenneth. 1996. **Friction, Wear, Lubrication : A Textbook in Tribology**. USA : CRC Press.
- Solichin, Moch. 2012. **Studi Eksperimental Laju Keausan (*Specific Wear Rate*) antara *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* Sebagai Sendi Lutut Buatan (*Total Knee Replacement Prosthesis*) Manusia**. Surabaya.
- Yoon, S.W., M.W. Shin, W.G. Lee, H. Jang. 2012. **Effect of Surface Contact Conditions on the Stick–Slip Behavior of Brake Friction Material**. Amsterdam : Elsevier Scientific

Kurnia, Roy Yamsi. 2016. **Studi Eksperimen *Stick-slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contac Friction***. Surabaya  
[Unpublish]

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta, 2 Desember 1992, merupakan anak kedua dari 2 (dua) bersaudara. Penulis selama hidupnya telah menempuh pendidikan formal di SD Jaya Suti Abadi, SMP Al-Muslim Tambun, dan SMAN 1 Tambun Selatan. Setelah tamat pendidikan SMA tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya melalui jalur Kemitraan Mandiri dengan pilihan pertama

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Di jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, penulis aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan dan aktif sebagai pengurus di Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS dan Lembaga Ash-Shaff. Pernah menjabat sebagai Staff Ahli *Event Internal* Departemen Umum Himpunan Mahasiswa Mesin Periode 2012-2013, *Director of Fundrising* kegiatan Mechanical City 2012. Serta terlibat aktif dalam kegiatan kepanduan di LKMM Pra-TD FTI ITS, LKMM TD HMM FTI ITS. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail di: [grandika.andrayodi@gmail.com](mailto:grandika.andrayodi@gmail.com)